



Kalle Nurmi

Metrotunneliverkoston lämpöolosuhteiden hallinta Suomen ilmastossa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 5.9.2016

Valvoja: Professori Risto Kosonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Tuomas Laine

Tekijä Kalle Nurmi

Työn nimi Metrotunneliverkoston lämpöolosuhteiden hallinta Suomen ilmastossa

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

Pääaine LVI-tekniikka**Koodi** K3008

Työn valvoja Professori Risto Kosonen

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Tuomas Laine

Päivämäärä 5.9.2016**Sivumäärä** 71**Kieli** suomi

Tiivistelmä

Tarpeenmukaisten lämpöolosuhteiden saavuttaminen metrotunneliverkostossa on usein haastava tehtävä johtuen tunnelin suurista sekä vaikeasti arvioitavissa olevista ilma- ja lämpövirtauksista. Taloudellisesti ja ekologisesti kestävien sekä halutulla tavalla toimivien metrotunneliverkoston olosuhdehallintajärjestelmien toteuttaminen edellyttää sopivaa simulointiohjelmiston hyödyntämistä suunnittelun lähtötietojen selvittämistä varten. Suomen ilmastossa eniten haasteita metrotunnelin olosuhteille aiheuttaa kylmyys talvikuukausina.

Tässä diplomityössä tutkittiin suomalaista metrotunnelihanketta, Länsimetroa, lämpöolosuhteiden hallinnan näkökulmasta. Työssä Länsimetro vaihe 2:n tunneliosuus, kuilut, sekä maanalaiset metroasemat mallinnettiin tunneleiden dynaamiseen olosuhdelaskentaan kehitetyn simulointiohjelmiston, IDA Tunnelin, avulla. Simulointien avulla eriteltiin ja analysoitiin merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat erityisen kylmän talvi-ajan lämpötilojen hallintaan Länsimetron tunneliosuuksilla ja asemilla. Lisäksi määritettiin, kuinka paljon Länsimetron tunneliosuuden sekä asemien lämpötiloja on talvella mahdollista nostaa heikentämällä tunnelin ilmanvaihtoa sekä aerodynaamista toimintaa.

Simuloinneissa osoittautui, että Länsimetron tunnelin lämpötila pysyy talvella keskimäärin plussan puolella, mutta poikkeuksellisen ankaran pakkasjakson aikana tunnelin lämpötila putoaa nopeasti pakkasen puolelle. Lämpötilan voimakas putoaminen kovalla pakkasella on seurausta paineentasauskuilujen sekä metroasemien liukuporraskuilujen kautta kulkevista suurista ilmavirtauksista, jotka jäädyttävät tunnelia tehokkaasti pakkasjakson aikana. Kovalla pakkasella tunnelin lämpötilan putoamista voidaan hidastaa paineentasauskuilujen säleikköjen osittaisella sulkeamisella. Säleikköjen kuristaminen kuitenkin häiritsee tunnelin aerodynaamista toimintaa, mikä ilmenee ilmavirran nopeuksien, sekä yli- ja alipaineiskujen kasvuna tunnelissa sekä metroasemalla. Simuloinneissa osoittautui, että säleikkökuristuksen rajoittava aerodynaaminen tekijä on asemien oviaukkojen ilmavirran nopeudet, joiden raja-arvot ylittyvät ensimmäisenä, kun paineentasauskuilujen säleikköjä aletaan kuristaa. Jos ilmavirran raja-arvojen pieni ylitys sallitaan, on mahdollista käyttää säleikköjen kuristustasoa, jolla suurin osa tunnelista pystyttäisiin pitämään plussan puolella myös kovan pakkasjakson aikana.

Lisäksi simuloinneissa tutkittiin säleikköjen tarpeenmukaista aukiolon ohjausta painesäädön avulla. Simulointimalliin ohjelmoitiin makro, joka ohjasi säleikköjen aukioloa yli- tai alipaineen avulla. Paineohjaus ei simuloinneissa kuitenkaan selkeästi osoittautunut säleikköjen vakiokuristusta paremmaksi ratkaisuksi.

Avainsanat Olosuhdehallinta, tunneli, Länsimetro, simulointi, ilmavirtaus, säleikkö



Author Kalle Nurmi

Title of thesis The control of the thermal conditions of the subway tunnel network in Finnish climate

Degree programme Energy- and HVAC Technology

Major HVAC Technology

Code K3008

Thesis supervisor Professor Risto Kosonen

Thesis advisor Tuomas Laine, Master of Science (Technology)

Date 5.9.2016

Number of pages 71

Language finnish

Abstract

Achieving acceptable thermal conditions in the subway tunnel network is commonly challenging problem due to the major air- and heatflows which are difficult to predict. In order to implement well working, economically optimized and sustainable thermal control system for the subway tunnel, the suitable simulation program must be utilized. Finnish climate may cause frost in tunnel at wintertime, which is the most challenging indoor condition problem for the subway tunnel in Finland.

In this thesis, the Finnish subway-tunnel project, Länsimetro, was studied from the thermal conditions point of view. The aim of this study was to define the most important factors which will affect the control of the thermal conditions of the Länsimetro-tunnel in wintertime. In addition, it was analyzed how much it is possible to raise the temperature of the Länsimetro-tunnel by reducing the quality of aerodynamical function of the tunnel system. For the study, the newest part of the Länsimetro-line (Länsimetro phase 2) was modeled by using tunnel-specialized simulation program, IDA Tunnel.

The study proved that most of the time the temperature of the Länsimetro-line stays above zero degree, but when unusually severe frost-period occurs, the temperature of the Länsimetro-line will quickly drop below zero degree. A rapid fall in temperature is due to the major airflows, which go through the pressure relief shafts and the escalators in the underground stations. When unusually severe frost-period occurs, it is possible to slow down temperature falling by using partially-closed dampers in the pressure relief shafts. However, closing the dampers will disturb the aerodynamical function of the tunnel system, which can be seen as a growing airflow speeds and pressure shocks in the tunnel system. The study proved that the limiting factors of partially-closed dampers are airflow speeds in the stations. If the minor airflow speed limit overrun is allowed, it is possible to use the position of the dampers in which most of the tunnel could be kept above zero degree even during the hard frost.

In addition, the operation of the pressure-controlled dampers was studied. A macro, which controlled the opening-level of the dampers and which measured positive or negative pressure, was modelled into simulation model. The study proved that pressure-controlled dampers weren't noticeably better than the regular dampers.

Keywords Thermal conditions, tunnel, Länsimetro, simulation, airflow, damper

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Granlund Oy:lle osana Länsimetro vaihe 2 –projektia. Työn kimmokkeena oli tarve selvittää miten IDA Tunnel –simulointiohjelmistoa voitaisiin hyödyntää LVI-suunnittelun tukena maanalaisissa ratahankkeissa. Tärkeimmäksi sovelluskohteeksi nousi metrotunnelin talviaikainen lämpötilanhallinta ja sen mukanaan tuomat tunnelin aerodynaamiset haasteet. Tähän työhön käytettyjen satojen simulointituntien tuloksia on jo ennen työn valmistumista hyödynnetty Länsimetro-hankkeessa lähtötietoina, mikä osoittaa ohjelmiston hyödyllisyyden Granlund Oy:lle.

Kiitän Paavo Tikkasta sekä ohjaajaani Tuomas Lainetta, joiden ansiosta sain mahdollisuuden tehdä diplomityöni erittäin mielenkiintoisesta, mutta myös melko haastavasta aiheesta. Haluan myös kiittää EQUA Simulation AB:n Per Sahlinia ja Hans Johnssonia arvokkaista neuvoista IDA Tunnel –ohjelman käyttöön sekä teoriaan liittyen. Lisäksi kiitos Petri Pyykköselle, Vesa Ruohomäelle sekä Ari Ekströmille, joiden ansiosta sain työhön eri suunnittelualojen käytännön näkökulmaa. Kiitos myös valvojalleni Risto Kososelle arvokkaista kommentteista työni loppumetreillä.

Erityismaininta kuuluu perheelleni ja ystäväilleni, joilta sain ahkeraa kannustusta koko pitkän urakan ajan. Suurin kiitos kuuluu Emmalle, jonka kannustus, kärsivällisyys ja tuki ylitse muiden auttoi minua saamaan työni päätepisteeseen.

Espoossa 19.8.2016

Kalle Nurmi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Taustaa	1
1.2	Työn tavoitteet ja rakenne	3
2	Metrotunneliverkoston olosuhteiden mallintaminen	4
2.1	Tunneleiden dynaamiset simulointiohjelmistot	4
2.1.1	1D-virtauslaskenta	4
2.1.2	3D-virtauslaskenta	6
2.2	Tunnelin termodynaamisen mallintamisen fysikaaliset perusteet	7
2.3	Tunnelin aerodynaamisen mallintamisen fysikaaliset perusteet	11
2.3.1	Tunnelin luonnollinen ilmavirtaus	11
2.3.2	Junaliikenteen aiheuttama ilmavirtaus	13
3	Metrotunneliverkoston olosuhteisiin liittyvät viranomaismääräykset Suomessa	17
3.1	Olosuhdehallinnan ohjeistus	17
3.2	Metrotunnelin olosuhteiden suunnittelu	17
3.2.1	Lämpötekkinen suunnittelu	17
3.2.2	Ilmanvaihto	18
3.2.3	Aerodynaaminen mitoitus	19
3.2.4	Ilmanlaatu	20
3.3	Maanalaisen metroaseman olosuhteiden suunnittelu	21
4	Simulointi-case: Länsimetro vaihe 2	22
4.1	Tutkimuskohteen esittely	22
4.2	Tavoitteena tunneliverkoston talviaikainen lämpötilanhallinta	23
4.3	Mitoittavan pakkasjakson määrittäminen	24
4.4	Simuloinnin lähtötiedot	26
4.4.1	Tunneli	26
4.4.2	Paineentasauskuilut	28
4.4.3	Asemat	29
4.4.4	Junaliikenne	30
5	Metrotunnelin olosuhdeanalyysi	32
5.1	Termodynaaminen analyysi	32
5.1.1	Mitoituspakkasen vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin	32
5.1.2	Mitoituspakkasen vaikutus lämpötiloihin paikallisesti	34
5.1.3	Junaliikenteen vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin	36
5.1.4	Junaliikenteen vuoroväleistä aiheutuvat lyhyen aikavälin lämpötilan muutokset	37
5.1.5	Korkoprofiilin vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin	38
5.2	Aerodynaaminen analyysi	38
5.2.1	Kuilujen ilmavirrat	39
5.2.2	Kuilujen ilmavirtojen riippuvuus tunnelin korkoprofiilista	41
5.2.3	Junaliikenteen aiheuttamat lyhyen aikavälin ilmavirran muutokset kuiluissa	42

5.2.4	Asemien ilmavirrat	44
5.2.5	Tunnelin paineenvaihtelut	47
6	Kuilujen säleikköjen optimaalisen kuristusalueen määrittäminen	50
6.1	Lämpötilaprofiili	50
6.2	Ilmavirrat	51
6.3	Paineenvaihtelut	54
7	Kuilujen säleikköjen tarpeenmukainen aukiolon ohjaus	57
7.1	Säleikköjen paineohjauksen mallintaminen	57
7.2	Säleikköjen paineohjauksen vaikutus metrotunnelin olosuhteisiin	60
8	Johtopäätökset	65
9	Lähdeluettelo	68

Lyhenteet

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
HKL	Helsingin kaupungin liikennelaitos
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
IWEC	International Weather For Energy Calculations
MSK	Metrosuunnittelun käsikirja
RakMK	Suomen Rakentamismääräyskokoelma
RATO	Ratatekniset ohjeet
RYMTL	Rautateiden maanrakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset
SES	Subway Environmental Simulation

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Maailman suurkaupungeissa maanalainen metroverkosto on yksi tärkeimmistä liikennejärjestelmistä. Kasvavan väestömäärän tarpeisiin on rakennettava yhä suurempia ja monimutkaisempia metroverkostoja, joiden toiminnan ja turvallisuuden hallinta vaatii paljon erityisosaamista. Eräs tärkeä osa-alue on tunneliverkoston olosuhteiden hallinta. Tunneliverkoston olosuhdehallinnalla tarkoitetaan tyypillisesti tunnelin ilmapvirtausten tai lämpötilojen hallintaa siten, että metron tehokas toiminta, riittävä ilmanlaatu sekä matkustusmukavuus voidaan jatkuvasti säilyttää. Lisäksi maanalaisessa tulipalotilanteessa on pystyttävä säilyttämään olosuhteet, joilla mahdollistetaan ihmisten turvallinen evakuointi maanpinnalle.

Erilaisissa ympäristöissä sijaitsevat tunnelit sekä tietyn tunneliverkoston erityispiirteet määrittävät millaisia olosuhdehallintaratkaisuja kyseinen tunneliverkosto tarvitsee. Merkittäviä reunaehtoja tunnelin olosuhdesuunnittelulle asettavat esimerkiksi poikkeuksellisen kylmä tai kuuma ilmasto, huono ilmanlaatu saastuneissa suurkaupungeissa tai suurilla nopeuksilla kulkevien junien aiheuttamat aerodynaamiset ongelmat, kuten esimerkiksi haitallisen suuret paineiskut ja ilmapirran nopeudet.

Maailmalla on useita kylmillä alueilla sijaitsevia junaliikennetunneleita mm. Kiinassa, Kanadassa, Norjassa, Japanissa ja Venäjällä. Kylmistä talvista johtuen pakkanen saattaa tunkeutua syvälle tunneleihin. Kylmien tunneleiden routavauriot haittaavat huomattavasti tunnelien liikennöintiä (Lai, et al., 1999). Lisäksi kova pakkanen vaurioittaa tunnelin seinämän lujitusrakenteita, jotka tyypillisesti tehdään ruiskubetonista (Chen, et al., 2015). Myös tunnelissa kulkeva LVI-tekniikka sekä turvalaitetekniikka saattaa vaurioitua jäätyessään (Ekström, 2016; Ruohomäki, 2016). Tunnelin jäätymisongelmia voidaan ehkäistä erilaisilla eristys-, saattolämmitys- ja ilmanvaihtoratkaisuilla.

Kuumemmilla alueilla varsinkin kesäaikana metrojunien aiheuttama lämpökuorma voi nostaa lämpötilan tunnelissa ja metroasemilla haitallisen kuumaksi. Korkeat lämpötilat puolestaan huonontavat matkustajien viihtyvyyttä. Esimerkiksi New Yorkin metrossa voi metron tuottama lämpö nostaa tunnelin ja asemien lämpötilan 8-11 °C ympäristön lämpötilan yläpuolelle. Lontoon metrossa on puolestaan mitattu kesä-aikana yli 37°C:n lämpötiloja. Eräs tunneli-ilman jäähdytyskeino on kierrättää ilmaa lämmönsiirtimen läpi, jonka toisella puolella kiertää pumpattua pohjavettä. (Ampofo, et al., 2004.)

Maailman suurkaupunkien metroissa on alettu kiinnittää huomiota huonoon ilmanlaatuun. Lähes kaikkialla on mitattu kohonneita hiukkaspitoisuuksia, jotka ovat ihmiselle haitallisella tasolla. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että maanalaisten metroasemien PM-hiukkaspitoisuudet ovat poikkeuksetta korkeampia, ollen pahimmillaan jopa 8 kertaa suurempia kuin maan päällä (Carteni, et al., 2015). Esimerkiksi Etelä-Koreassa Soulin metrossa on joillekin asemille rakennettu reaaliaikainen monitorointijärjestelmä, jolla mitataan sisäilman saasteita (NO , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO ja CO_2), ja kerättyä dataa voidaan käyttää ilmanvaihdon tehostamiseen (Kwon, et al., 2015). Metrolaiturin ilmanlaatua voidaan parantaa ilmanvaihdon lisäksi myös ns. metrolaituriovilla (engl. platform screen doors), joiden avulla metrolaituri voidaan erottaa metrotunnelista omaksi ilmatilakseen.

Tällöin metrolaiturin ilmaa on helpompi suojella tunnelipölyltä sekä junan aiheuttamalta viimalta (Yang, et al., 2015).

Kasvavien liikennekuormien myötä myös tunneleissa kulkevien junien mitoitusnopeudet ovat kasvaneet. Tunnelissa nopeasti liikkuva juna aiheuttaa voimakkaita painenvaihteluita ja ilmavirtauksia, jotka heikentävät matkustusmukavuutta, aiheuttavat meluhaittoja tunnelin ympäristöön, lisäävät junan kulkuvastusta tunnelissa sekä saattavat vaurioittaa tunnelin rakenteita ja tunnelissa kulkevaa tekniikkaa (Ko, et al., 2012). Tämän vuoksi tunnelin aerodynaaminen mitoitus on tärkeä olosuhdehallinnan osa-alue. Tunnelin aerodynaamista toimintaa voidaan säädellä esimerkiksi tunneliverkostoon rakennettavilla paineentasauskuiluilla, joiden kautta tunnelin ilma pääsee vapaasti vaihtumaan.

Tunnelipalon sattuessa savun leviämisen hallinta on tärkeää turvallisen evakuoinnin varmistamiseksi. Metrotunnelin tulipalotilannetta ohjataan koneellisella savunpoistojärjestelmällä. Tällöin savukaasut pyritään ohjaamaan mahdollisimman kauas pois hätäpoistumisteiden lähetyviltä. Turvallisuusnäkökulmasta katsottuna metrotunnelin savunpoiston varma toiminta on yksi tärkeimmistä olosuhdehallinnan osa-alueista. (Li, et al., 2014.)

Tarpeenmukaisten sisäolosuhteiden suunnittelu metrotunneliverkostossa oleviin tiloihin on usein haastava tehtävä. Tyypillinen metrotunneliverkosto koostuu pitkistä ja eri suuntiin kulkevista tunneleista, useista maanalaisista metroasemista sekä erilaisista kuilurakenteista, joiden kautta tunnelista on yhteys maanpinnalle. Sisäilmaston tunnuslukujen (esim. lämpötila, ilmavirran nopeus tai ilman painenvaihtelut) arvioiminen voi tällöin olla varsin vaikeaa. Metrotunneliverkoston ilma- ja lämpövirtaukset sekä ilman epäpuhtaus taso ovat seurausta monimutkaisten fysikaalisten ilmiöiden vuorovaikutuksesta. Näitä ovat esimerkiksi liikkuvan junan aiheuttama mäntäefekti, tunnelin painovoimainen ilmavirtaus, tunnelipölyn muodostuminen, tunnelia ympäröivän maaperän lämpötekniinen käyttäytyminen, maaperästä tunneliin tihkuva vesi sekä tunnelin taloteknisten laitteiden toiminta. (Sahlin, et al., 2006.)

On varsin yleistä, että metroverkoston olosuhteita ylläpitäviin järjestelmiin sijoitetaan suuria summia, mutta silti järjestelmän toiminta osoittautuu riittämättömäksi tai kyseiseen tarkoitukseen sopimattomaksi. Varsinkin uudemmissa metroverkostoissa on tyypillisesti suuren kapasiteetin talotekniikka-järjestelmiä, joiden investointikustannukset sekä energiankulutus ovat huomattavan suuria. Taloudellisesti ja ekologisesti kestävien, sekä halutulla tavalla toimivien metroverkoston olosuhdehallintajärjestelmien toteuttaminen edellyttää tunneliverkoston fysikaalisen käyttäytymisen vahvaa ymmärrystä sekä mahdollisimman realistista olosuhteiden mallinnusta dynaamisen simulointiohjelmiston avulla. (Sahlin, et al., 2006.)

Ilman sopivaa simulointiohjelmistoa metrotunneliverkoston olosuhteiden arvioiminen etukäteen on lähes mahdoton tehtävä. Tunneleiden olosuhdesuunnitteluun eivät tyypillisesti sovellu samat simulointiohjelmit kuin maanpäällisissä kohteissa, vaan niihin tulee käyttää tunneleiden erityispiirteet hallitsevia simulointiohjelmita. Simulointiohjelmistolla on esimerkiksi pystyttävä laskemaan painovoimaiset sekä liikenteen aiheuttamat ilmavirtaukset tunnelissa, maaperän termodynaaminen käyttäytyminen tunnelin ympäristössä, sisäilman puhtautta kuvaavat suureet, tunnelin seinämän läpi tihkuva vesimäärä sekä savun leviäminen tulipalotilanteessa.

1.2 Työn tavoitteet ja rakenne

Tässä työssä tutkitaan suomalaista metrotunneli-hanketta, Länsimetroa, lämpöolosuhteiden hallinnan näkökulmasta. Työn tärkeimpänä tavoitteena on eritellä ja analysoida merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat erityisen kylmän talvi-ajan lämpötilojen hallintaan Länsimetron tunneliosuuksilla sekä asemilla. Tavoitteena on myös määrittää, kuinka paljon Länsimetron tunneliosuuden sekä metroasemien lämpötiloja on talvella mahdollista nostaa heikentämällä tunnelin ilmanvaihtoa sekä aerodynaamista toimintaa. Lisäksi työn tarkoitus on tarjota lähtötietoja Länsimetron LVI-suunnittelijoille.

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta sekä empiirisestä osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään metrotunneliverkoston olosuhteiden mallintamiseen ja simulointiohjelmistoihin. Aluksi esitellään tunnelisimuloinnissa käytettäviä 1D- ja 3D-virtauslaskentaohjelmistoja, jonka jälkeen syvennyttään simulointiohjelmistojen taustalla olevaan tunnelin termodynamiikan ja aerodynamiikan teoriaan. Tämän jälkeen kirjallisuuskatsauksessa tutustutaan metrotunneliverkoston olosuhteisiin liittyviin viranomaismääräyksiin Suomessa, sekä miten niiden avulla metrotunnelin tai maanalaisen metroaseman olosuhteita voidaan suunnitella.

Työn pääpaino on empiirisessä osuudessa, jossa Länsimetro-hankkeen toista vaihetta (tunneliosuus Matinkylästä Kivenlahteen sekä 5 maanalaista metroasemaa) analysoidaan olosuhdesimulointien avulla. Työssä Länsimetro vaihe 2:n tunneliosuus, kuilut, sekä maanalaiset asemat mallinnetaan tunneleiden dynaamiseen olosuhdelaskentaan kehitetyn simulointiohjelman (IDA Tunnel) avulla.

Aluksi työn empiirisessä osuudessa tutustutaan tarkemmin Länsimetro-hankkeeseen sekä sen tärkeimpiin lähtötietoihin simulointien näkökulmasta. Lisäksi käydään tarkemmin läpi, mitkä taustatekijät motivoivat tutkimaan Länsimetro-hanketta olosuhdesimulointien avulla.

Tämän jälkeen simulointien tulokset käydään läpi kolmessa eri kappaleessa. Tulokappaleista ensimmäisessä tehdään metrotunnelin olosuhdeanalyysi, jossa Länsimetro vaihe 2:n termodynaaminen ja aerodynaaminen käyttäytyminen poikkeuksellisen kylmän pakkasjakson aikana selvitetään. Toisessa tulokappaleessa selvitetään Länsimetron paineentasauskuilujen säleikköjen kuristamisen lämpötiloja kohottava vaikutus sekä tutkitaan, kuinka paljon tunnelin aerodynaamiset olosuhteet samalla heikentyvät. Tavoitteena on määrittää säleiköille optimaalinen kuristusalue, jolla lämpötila tunnelissa putoaa mahdollisimman vähän kuitenkin samalla pitäen ilmavirran nopeudet sekä paineiskut hyväksyttävällä tasolla. Kolmannessa tulokappaleessa tutkitaan säleikköjen tarpeenmukaista aukiolon ohjausta painesäädön avulla, sekä tarpeenmukaisen aukiolon vaikutusta metrotunnelin olosuhteisiin.

2 Metrotunneliverkoston olosuhteiden mallintaminen

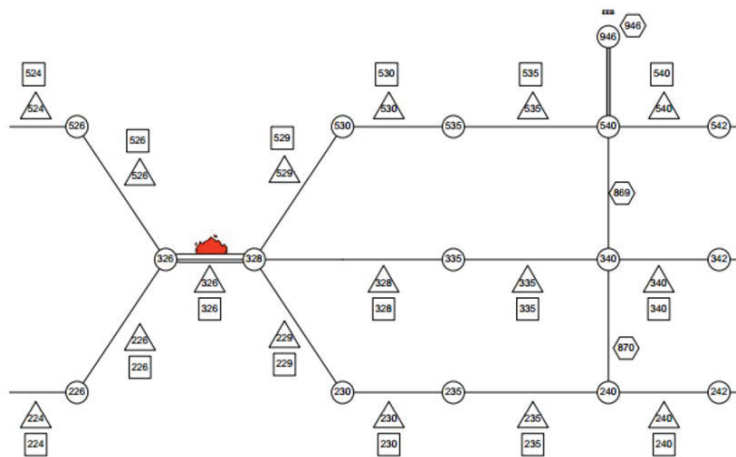
2.1 Tunneleiden dynaamiset simulointiohjelmit

2.1.1 1D-virtauslaskenta

Tunneleiden dynaamisten simulointiohjelmien kehitys alkoi 1970-luvulla, jolloin tunnelimallinnuksen teoreettiset perusteet luotiin ja erilaisia mallikokeita suoritettiin. Ensimmäiset ohjelmat olivat 1-dimensionaalisia virtauslaskentaohjelmia, jotka ovat edelleenkin suosittuja monikäyttöisyytensä vuoksi. Dynaaminen 1-dimensionaalinen virtauslaskenta pohjautuu epästationäärisen virtauskentän teoriaan, jossa liikkuva juna siirtää ilmaa mukanaan tunnelissa. (Kim & Kim, 2009.)

1D-virtauslaskennassa ilman ominaisuudet (nopeus, paine, lämpötila) oletetaan homogeeniseksi tunnelin poikkileikkauksessa. Tämä on hyväksyttävä yksinkertaistus tilanteissa, joissa ilmavirrat ovat pääasiassa pitkittäissuuntaisia, niin kuin tunneleissa pääpiirteittäin on. 1D-virtauslaskennan avulla on mahdollista simuloida samanaikaisesti tunnelin aerodynaamista ja termodynaamista käyttäytymistä sekä esimerkiksi tulipalon leviämistä maan alla. (Rail System, 2015.)

Todennäköisesti tunnetuin 1-dimensionaalinen metrotunnelien dynaaminen simulointiohjelma on 1970-luvun puolivälissä kehitetty SES-ohjelmisto (Subway Environmental Simulation). SES-ohjelmistoa on käytetty laajasti tunneleiden olosuhteiden suunnittelussa ympäri maailmaa (Kim & Kim, 2009). SES-ohjelma on suunnittelijoille suunnattu työkalu, jonka avulla on mahdollista selvittää metrotunneliverkoston suunnitteluparametrien vaikutukset tunneliverkoston olosuhteisiin. SES-ohjelman avulla voidaan mitoittaa esimerkiksi optimaalinen metrotunnelin poikkileikkauksala, paineentasauskuilujen sijainti ja pituus sekä liikkuvan metrojunan mitoitusparametrit (nopeus, vuoroväli, ja ulkoiset mitat). (US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, 2002.)



Kuva 1. SES-ohjelman käyttöliittymä. Metrotunneliverkosto mallinnetaan kaaviomaisen solmupisteverkon avulla. (Rail System, 2015.)

Lin et al. (2008) ovat tutkineet SES-ohjelman avulla junien mäntäefektin aiheuttamia ilmapvirtauksia maanalaisella metroasemalla. Tutkimuksessa vertailtiin kenttämittausten ja SES-simulointiohjelman tuloksia ja osoittautui, että ilmapvirtojen nopeusprofiilit olivat lähes yhdenmukaiset simulointien ja mittaustulosten kesken. (Lin, et al., 2008.)

Jun et al. (2015) ovat selvittäneet SES-ohjelman avulla metrotunneliverkoston lämpötekniistä käyttäytymistä sekä kuumen kesäajan, että kylmän talviajan tilanteessa. Simulointien tarkoituksena oli varmistaa, että lämpötilat pysyvät sekä kesällä että talvella hyväksyttävissä rajoissa. (Jun, et al., 2015.)

Hu & Lee (2004) ovat tutkineet metrolaituriovien vaikutusta metroaseman energiankulutukseen. Tutkimuksen osana hyödynnettiin SES-ohjelmistoa. Tulokset osoittivat, että metrolaituriovilla voidaan vähentää jäähdytystarvetta merkittävästi, ja näin ollen optimoida jäähdytyslaitteistojen kapasiteettia. (Hu & Lee, 2004.)

SES-ohjelman kehityksen jälkeen tietokoneet ja laskentaohjelmistot ovat kehittyneet merkittävästi. Tämä on luonut mahdollisuuden kehittää fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kattavampia ja tarkempia 1-dimensionaalisia tunneleiden simulointiohjelmistoja. Eräs tällainen ohjelma on IDA Tunnel. IDA Tunnel pohjautuu samaan teoriaan kuin SES, mutta siihen on lisätty uusia fysikaalisia ominaisuuksia, kuten maaperän lämpötilajakauman, sekä painovoimaisten ilmapvirtausten tarkempi laskenta, ilman laatua kuvaavien suureiden laskenta sekä järjestelmän ohjausmahdollisuus mitattujen suureiden perusteella. (Sahlin, et al., 2006.)

IDA Tunnel –ohjelman käyttöliittymässä käyttäjä kokoaa topologisen kaavion simuloitavasta tunneliverkostosta ja sen komponenteista. Käyttäjä valitsee tunneliverkoston ja sen komponenttien ominaisuudet suunniteltavan kohteen lähtötietojen perusteella. Ohjelman kehittäjät sekä kokeneemmat käyttäjät voivat itse luoda uusia fysikaalisia simulointimalleja lisäämällä koodia IDA-simulointiympäristöön (Sahlin & Grozman, 2003). IDA-simulointiympäristö on rakennettu Modelica-alustalle. Modelica on ohjelmointikieli, jolla voi mallintaa monimutkaisia fysikaalisia järjestelmiä, esim. mekaniikkaan, sähkötekniikkaan, lämpö- ja virtaustekniikkaan, automaatiotekniikkaan sekä prosessitekniikkaan liittyen (Modelica, 2016).

Modelica-alustaisen simulointiympäristön suurin hyöty käyttäjille on siinä, että simulointiympäristön differentiaaliyhtälöt voidaan määritellä ilman, että käyttäjän tarvitsee itse huolehtia siitä, miten kyseiset yhtälöt tulee ratkaista. Tämä tekee IDA Simulointiympäristön koodista verraten yksinkertaista ja ytimekästä. (Sahlin, et al., 2006.)

IDA Tunnelia on käytetty todellisissa hankkeissa vuodesta 2003 alkaen. Lisäksi IDA Tunnelin ja SES-ohjelman välillä on tehty vertailevia tutkimuksia, joilla on varmistettu, että tulokset täsmäävät kahden eri ohjelman välillä. (Sahlin, et al., 2006.)

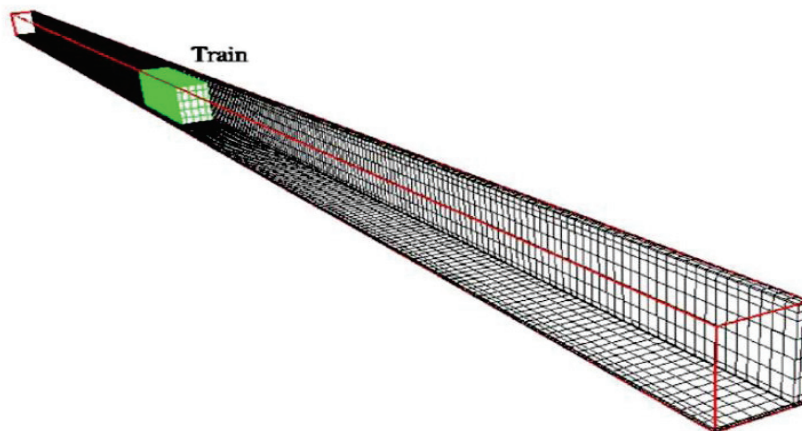
IDA Tunnelia on käytetty mm. Lontoon metron olosuhdesimulointeihin (Victoria Line, sis. 5 metroasemaa). Simulointien tarkoituksena oli selvittää tunnelin ilmapvirtaukset sekä lämpötilajakaumat tunnelin jäähdytysjärjestelmien suunnittelua varten. Lisäksi simuloinneissa vertailtiin eri jäähdytysratkaisujen tehontarpeita. IDA Tunnelia on hyödynnetty myös Ruotsissa Tukholman metron, Tukholman lähijunaliikennetunnelin sekä Göteborgin junaliikennetunnelin simuloinneissa. Simuloinneilla selvitettiin tunnelin hiukkaspitoisuuksia,

optimaalista ilmanvaihdon ohjausta, tunnelin savunpoiston suunnittelua sekä tunnelin talviaikaista lämpötilanhallintaa. (Sahlin, 2014.)

2.1.2 3D-virtauslaskenta

1D-virtauslaskentaohjelmat ovat sopivia metrotunneliverkoston olosuhteiden karkeaan mitoitukseen silloin, kun halutaan tarkastella isoa kokonaisuutta, esimerkiksi useampaa maanalaista metroasemaa, asemien välillä olevaa tunneliosuutta sekä näihin yhteydessä olevia paineentasauskuiluja (Kim & Kim, 2009). Kun halutaan mallintaa tarkasti pienempiä kokonaisuuksia, esimerkiksi ilmavirran nopeusjakaumaa tunnelin tietyssä osassa tai liikkuvan junan aiheuttamaa painekentän muotoa, edellyttää tämä usein 3D-virtauslaskennan hyödyntämistä (Rail System, 2015).

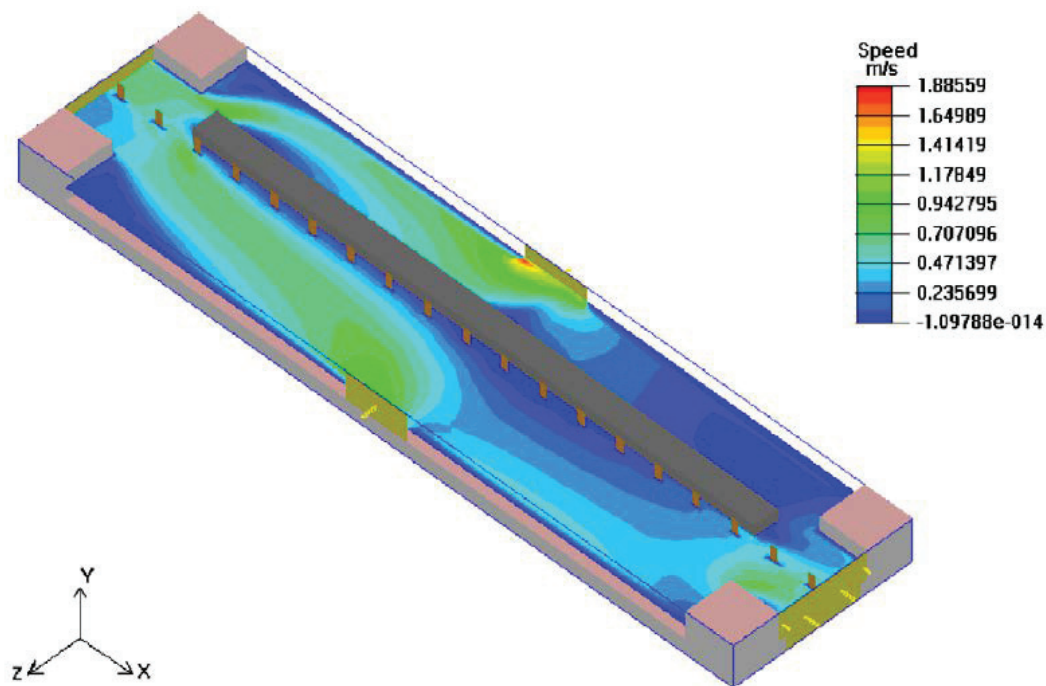
Tunnelissa kulkevan junan 3D-virtausmallinnuksen haasteena on kapeassa tilassa nopeasti liikkuvan kiinteän kappaleen ja ilman rajapinnan mallinnus. Ongelmaa voidaan käsitellä erilaisten numeeristen ruudukkomenetelmien avulla, joissa tutkittava tila jaetaan tietyn kokoiisiin ruutuihin (kuva 2). Metrotunnelisovelluksissa eräs hyväksi todettu ruudukkomenetelmä on ns. ”terävän rajapinnan menetelmä” (engl. sharp interphase method), jossa tunnelin ruudukko kuvataan vuorotellen kiinteänä elementtinä ja toisaalta taas fluidina riippuen siitä missä kohtaa juna liikkuu ruudukkoon nähden. (Kim & Kim, 2009.)



Kuva 2. 3D ruudukkomenetelmän mallinnus (Kim & Kim, 2009).

Kim ja Kim (2009) ovat käyttäneet terävän rajapinnan ruudukkomenetelmää tutkimuksessa, jossa selvitettiin metrotunnelin ilmanvaihdon tehokkuutta. Tutkimuksessa ilmanvaihdon tehokkuutta arvioitiin paineentasauskuilun sijainnin perusteella analysoimalla kuilun ilmavirran suuruus sekä virtauskentän muoto kuilun ympärillä. Tutkimus osoitti, että optimaalinen paineentasauskuilun sijainti on lähellä metroasemaa. (Kim & Kim, 2009.)

Eräs kaupallinen tunnelisovelluksissa hyödynnetty 3D-virtauslaskentaohjelmisto on AIRPAK-ohjelmisto. Yuan & You (2007) ovat selvittäneet metroaseman ilman lämpötilajakauman sekä ilmavirran nopeusjakauman AIRPAK-ohjelmiston avulla. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää metroasemalle optimaalinen ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvassa 3 esitetään tutkimuksessa laskettu metrolaiturin ilmavirran nopeusjakauma. (Yuan & You, 2007.)



Kuva 3. Ilmavirran nopeusjakauma metrolaiturilla AIRPAK-ohjelmistolla laskettuna (Yuan & You, 2007).

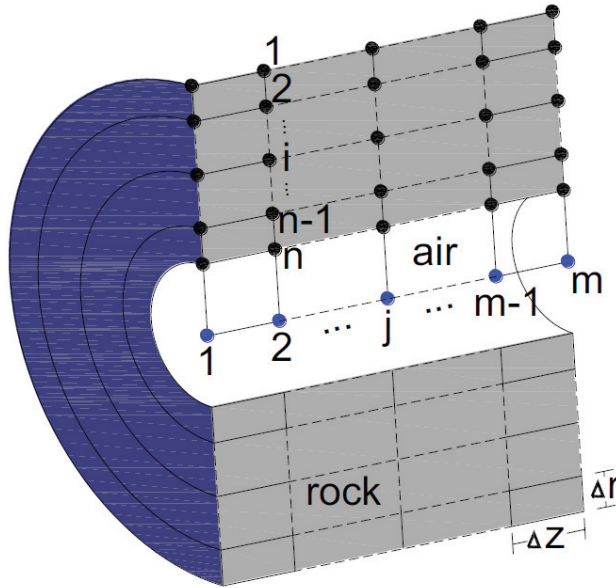
3D-virtausmallinnusta on hyödynnetty laajalti myös metrotunneleiden tulipalojen simuloinneissa. Tunnelipalon sattuessa savun leviämisen hallinta on tärkeää turvallisen evakuoinnin varmistamiseksi. Savukaasujen leviämisen 3D-mallinnuksen avulla on mahdollista asettaa savunpoistopuhaltimet toimimaan oikein. Lisäksi savukaasumallinnusta voidaan hyödyntää esimerkiksi havainnollistamaan palokunnan toimintaa tulipalotilanteessa. (Li, et al., 2014.)

2.2 Tunnelin termodynaamisen mallintamisen fysikaaliset perusteet

Tässä osassa perehdytään tunnelin termodynamiikan mallintamiseen, joka on tunneleiden simulointiohjelmien toiminnan perustana. Teoria käydään läpi IDA Tunnel –ohjelman kehittäjien mukaan, mutta sisällöllisesti teoria on hyvin samankaltainen esimerkiksi SES-ohjelmiston kanssa (EQUA Simulation AB, 2012).

Tunnelissa tapahtuva lämmönsiirto on dynaaminen ilmiö, jossa tulee ottaa huomioon tunnelin ilmavirtaukset, lämpövirta tunnelin seinämän läpi, tunnelin lämpökuormat junista ja laitteista, tunnelin kosteuskuormat sekä ulkoilman olosuhteet. Tunnelin lämpödynaaminen malli voidaan esittää ns. solmupisteverkon avulla, jossa tunneliverkosto jaetaan solmupisteisiin, jotka kuvaavat tunnelin lämpötiloja. Jokainen lämpötilasolmupiste esitetään energiatasetta kuvaavalla differentiaaliyhtälöllä (Sirén, 2013). Lämpöteknisesti tunneli ja sen ympärillä oleva maaperä voidaan kuvata sylinterinä, jonka lämpötilasolmupisteet voidaan

esittää sylinterikoordinaatistossa (Liu, et al., 2014). Kuvassa 4 havainnollistetaan tunnelin sylinterikoordinaatistoesitystä.



Kuva 4. Tunnelin ilman ja tunnelia ympäröivän maaperän solmupisteverkko sylinterikoordinaatistossa (Liu, et al., 2014).

Sylinterikoordinaatiston etuna voidaan pitää sitä, että tunnelin aksiaalisessa suunnassa kulkeva lämpövirta (ilmavirta), sekä säteen suunnassa kulkeva lämpövirta (lämmönsiirto tunnelin ilman sekä seinärakenteen välillä) voidaan esittää helposti saman yhtälön avulla. Näin ollen tunnelin sisällä olevalle ilman solmupisteelle voidaan määritellä seuraava energiatase (EQUA Simulation AB, 2012):

$$\rho_i l_i A_i \frac{dE_i}{dt} + \Delta(\dot{m}E)_i = Q_{air_i} + Q_{veh_i} + Q_{equi_i} + Q_{cond_i} - Q_{evap_i} \quad (1)$$

jossa

- E_i = ilman entalpia tunnelin osassa i (J/kg)
- ρ_i = ilman tiheys tunnelin osassa i (kg/m³)
- l_i = tunnelin osan i pituus (m)
- A_i = tunnelin osan i poikkipinta-ala (m²)
- $\Delta(\dot{m}E)_i$ = tunnelin ilmavirran kuljettama, tunnelin aksiaalisessa suunnassa kulkeva lämpövirta (W). Kyseinen termi on diskretoitu, joten sen derivaattatermi on korvattu differenssitermillä.
- \dot{m}_i = ilman massavirta tunnelin osassa i (kg/s)
- Q_{air_i} = $l_i \left(\frac{4A_i}{d_i} \right) U_i (T_{wall_i} - T_i)$ = tunnelin säteen suunnassa tapahtuva lämmönsiirto seinämän ja ilman välillä (W)
- d_i = tunnelin halkaisija osassa i (m)
- U_i = tunnelin osan i kokonaislämmönsiirtokerroin, jossa huomioitu konvektio sekä säteily. (W/m²°C)
- T_{wall_i} = tunnelin seinämän lämpötila osassa i (°C)

T_i	=	tunnelin ilman lämpötila osassa i (°C)
Q_{veh_i}	=	junista vapautuva lämpö tunnelin osassa i (W)
Q_{equi_i}	=	laitteista vapautuva lämpö tunnelin osassa i (W)
Q_{cond_i}	=	ilman kondensoitumisesta vapautuva lämpö tunnelin osassa i (W)
Q_{evap_i}	=	kosteuden haihtumiseen tarvitsema lämpö (W)

Tunnelin seinämän lämpötilan laskennassa on otettava huomioon 3 eri lämpötilakomponenttia: häiriintymättömän maaperän lämpötila (engl. undisturbed ground temperature), maaperän geoterminen lämpötila sekä tunnelin olosuhteista riippuva maaperän lämpötila. Kun eri lämpötilakomponenttien lämpötilakentät yhdistetään superpositioperiaatteella, saadaan laskettua todellinen lämpötila tunnelin seinämässä. (EQUA Simulation AB, 2012)

Häiriintymättömän maaperän lämpötilan laskennassa otetaan huomioon ympäristön lämpötilan vaikutus. Laskennassa käytetään seuraavaa kaavaa (EQUA Simulation AB, 2012):

$$\rho_{gr} c_{pgr} \frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{gr} \frac{\partial T_z}{\partial z} \right) \quad (2)$$

reunaehdoilla

$$T_z = T_{amb}(t) \text{ maanpinnan tasolla } z=0$$

$$T_z = \overline{T_{amb}} \text{ laskenta-alueen pohjalla}$$

jossa

$$T_z = \text{häiriintymättömän maaperän lämpötila (°C)}$$

$$\rho_{gr} = \text{maaperän tiheys (kg/m}^3\text{)}$$

$$c_{pgr} = \text{maaperän ominaislämpökapasiteetti (J/kg°C)}$$

$$k_{gr} = \text{maaperän lämmönjohtavuus (W/m°C)}$$

$$T_{amb}(t) = \text{ympäristön lämpötila (°C)}$$

$$\overline{T_{amb}} = \text{ympäristön lämpötilan keskiarvo (°C)}$$

Maaperän geotermisen lämpötilan laskennassa otetaan puolestaan huomioon geoterminen lämpötilagradientti seuraavan kaavan avulla (EQUA Simulation AB, 2012):

$$T_g = gradT \cdot z \quad (3)$$

jossa

$$T_g = \text{maaperän geoterminen lämpötila (=0 maanpinnalla) (°C)}$$

$$gradT = \text{geoterminen lämpötilagradientti (°C/m)}$$

$$z = \text{maaperän pystykoordinaatti, maanpinnalla } z=0 \text{ (m)}$$

Lopuksi lasketaan tunnelin olosuhteista riippuva maaperän lämpötila käyttämällä 1-dimensionaalista lämpötaseyhtälöä sylinterikoordinaatistossa (EQUA Simulation AB, 2012):

$$2\pi\rho_{wall}(r)c_{pWall}(r)\frac{\partial T_r}{\partial t} = 2\pi\frac{\partial}{\partial r}\left(k_{wall}(r)r\frac{\partial T_r}{\partial r}\right) + m_{seep}c_{pWat}\frac{\partial T_r}{\partial r} \quad (4)$$

reunaehdoilla

$$-2\pi k_{wall}(r_0)r_0\frac{\partial T_r}{\partial r} = \alpha(T_{air} - T_{wall}) + Q_{wall}/l \quad \text{tunnelin seinämän pinnassa } r_0$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial r} = 0 \text{ tai } T_r = 0 \quad \text{laskenta-alueen ulkoreunassa}$$

jossa

T_r	=	tunnelin olosuhteista riippuva maaperän lämpötila etäisyydellä r tunnelin poikkileikkauksen keskipisteestä (°C)
$\rho_{wall}(r)$	=	seinämämateriaalin tiheys kohdassa r (kg/m ³)
$c_{pWall}(r)$	=	seinämämateriaalin ominaislämpökapasiteetti kohdassa r (J/kg°C)
$k_{wall}(r)$	=	seinämämateriaalin lämmönjohtavuus kohdassa r (W/m°C)
m_{seep}	=	tunnelin seinämän pinnasta tunneliin tihkuva vesi (kg/sm)
c_{pWat}	=	veden ominaislämpökapasiteetti (J/kg°C)
r_0	=	tunnelin säde (m)
α	=	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin tunnelin seinämän ja ilman välillä (W/m ² °C)
T_{air}	=	tunnelin ilman lämpötila (°C)
T_{wall}	=	lämpötila tunnelin seinämän pinnassa (°C)
Q_{wall}	=	tunnelin seinämän pintaan saapuvat lämpövirrat (esim. säteily) (W)

Maaperän hidas reagointi ympäristön olosuhdemuutoksiin on otettava huomioon, kun lasketaan tunnelin olosuhteita pitkällä aikavälillä. Simuloinneissa on pystyttävä varmistamaan, ettei mahdollinen virheellinen maaperän lämpötilakentän alkuarvo vaikuta virheellisesti itse simulointien tuloksiin. Siksi tunnelisimuloinnissa suoritetaan aluksi ns. ”longterm” –laskenta, jossa tunnelin maaperän käyttäytymistä simuloidaan usean vuoden ajan (esim. 30 vuotta), jotta saadaan määritettyä tunnelia ympäröivän maaperän keskimääräinen stabiloitunut lämpötilakenttä. (EQUA Simulation AB, 2013.)

Kun tunnelia ympäröivän maaperän keskimääräinen stabiloitunut lämpötilakenttä saadaan määritettyä, voidaan laskentaa tarkentaa selvittämällä joko yhden talvijakson (joulukuuhelmikuu) tai yhden kesäjakson (maaliskuu-elokuu) vaikutus maaperän lämpötilakenttään tekemällä joko ”winter season” tai ”summer season” –simulointi. Lopulta ollaan yleensä kiinnostuneita ääriolosuhteiden vaikutuksesta tunnelin olosuhteisiin, joten viimeisenä voidaan tehdä mitoittava simulointi, jossa valittua mitoituspäivää simuloidaan tyypillisesti 1-10 päivää peräkkäin. Tämän tyylinen kolmeen osaan jaettu simulointiprosessi mahdollistaa tarkan lopputuloksen laskemisen sekä säästää simulointiaikaa. (EQUA Simulation AB, 2013.)

2.3 Tunnelin aerodynaamisen mallintamisen fysikaaliset perusteet

Vastaavasti kuin tunnelin termodynamiikkaa käsittelevässä osassa, on tunnelin aerodynamiikan teoria esitetty IDA Tunnel –ohjelman kehittäjien mukaan, ja se on lähes täysin yhdenmukainen SES-ohjelmiston teorian kanssa. Tunnelin aerodynamiikan perusteet esitetään 1D-virtauslaskennan näkökulmasta, mikä tarkoittaa, että ilman ominaisuudet (nopeus, paine, lämpötila) oletetaan homogeeniseksi tunnelin poikkileikkauksessa (Rail System, 2015). Teoriaa, joka liittyy erityisesti 3D-virtauslaskentaan, ei tässä käsitellä.

2.3.1 Tunnelin luonnollinen ilmapvirtaus

Tunnelin luonnollinen ilmapvirtaus syntyy, kun kahden pisteen välille muodostuu lämpötilaerosta, korkeuserosta tai tuulenpaineesta aiheutuva tiheysero, joka pyrkii tasoittumaan. Ilman tiheys on siis lämpötilan ja paineen funktio. Jos tuulen painetta ei huomioida, voidaan tunnelin suuaukon korkeudella vallitseva staattinen paine ilmaista tiheyden avulla seuraavasti (EQUA Simulation AB, 2013):

$$p_{height} = - \int_0^h \rho(T, p(z)) g \cdot dz + p_{amb} \quad (5)$$

jossa

- p_{height} = ilman staattinen paine tunnelin suuaukon korkeudella, mutta ei kuitenkaan tunnelin suuaukon vaikutusalueella (Pa).
- h = tunnelin suuaukon korkeus referenssisitasoon (=0) verrattuna (m)
- ρ = ilman tiheys (kg/m³)
- T = ilman lämpötila (K)
- $p(z)$ = ilman paine korkeuseron funktiona (Pa)
- g = gravitaatiokiihtyvyys (m/s²)
- p_{amb} = ilman paine referenssisitasolla 0 m (Pa)

Tarkastellaan tämän jälkeen tunnelin suuaukossa vallitsevaa staattista painetta p_{P1} . Oletetaan, että ilma virtaa tunnelissa nopeudella v . Oletetaan lisäksi, että tunnelin suuaukossa vallitsee tuulenpaine p_{wind} . Nyt voidaan määritellä (EQUA Simulation AB, 2013):

$$p_{P1} = p_{height} + p_{wind} - k_{entry} \frac{\rho}{2} v^2 - \frac{\rho}{2} v^2 \quad (6)$$

jossa

- p_{P1} = tunnelin suuaukossa vallitseva staattinen paine (Pa)
- p_{wind} = tunnelin suuaukossa vallitseva tuulen paine (Pa)
- k_{entry} = tunnelin suuaukon kertavastusktkakerroin
- v = ilman virtausnopeus tunnelissa (m/s)

Kaavan 6 termi $\frac{\rho}{2} v^2$ kuvaa ilmapirran liikkeestä aiheutuvaa dynaamista painetta. Termi $k_{entry} \frac{\rho}{2} v^2$ puolestaan kuvaa tunnelin suuaukon painehäviötä.

Kun siirrytään tunnelin suuaukolta sisälle tunneliin pisteeseen $P2$, voidaan kyseisen pisteen staattinen paine määritellä (EQUA Simulation AB, 2013):

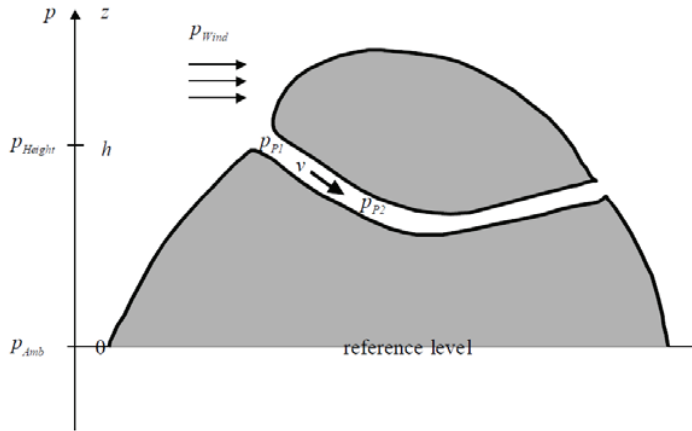
$$p_{P2} = p_{P1} - \frac{fL\rho}{D} \frac{v^2}{2} - \int_h^{P2} \rho(T,p)g \cdot dz \quad (7)$$

jossa

- p_{P2} = pisteessä $P2$ vallitseva staattinen paine (Pa)
- f = tunnelin seinämän kitkakerroin
- L = tunnelin pituus pisteiden $P1$ ja $P2$ välillä (m)
- D = tunnelin hydraulinen halkaisija (m)

Kaavassa 7 termi $\frac{fL\rho}{D} \frac{v^2}{2}$ kuvaa tunnelin seinämän painehäviötä, ja termi

$\int_h^{P2} \rho(T,p)g \cdot dz$ kuvaa tunnelin pisteiden $P1$ ja $P2$ välisestä korkeuserosta aiheutuvaa paineen muutosta. Kuvassa 5 esitetään tunnelin luonnollisen ilmavirtauksen aiheuttavat paineen komponentit.



Kuva 5. Tunnelin luonnollisen ilmavirtauksen komponentit (EQUA Simulation AB, 2013).

Korkeuserosta aiheutuva paineenmuutos on seurausta painovoimasta sekä kahden pisteen välisestä lämpötilaerosta. Ilmiötä kutsutaan myös ”savupiippuefektiksi”, ja sillä on todella merkitsevä rooli tunnelin luonnollisessa ilmavirtauksessa varsinkin talviaikana, jolloin ulkoilma on kylmempää kuin tunnelin sisällä oleva ilma (Mazarrón, et al., 2015). Tunnelin savupiippupaine (engl. stack pressure) voidaan ilmaista yhtälön 8 avulla seuraavasti (EQUA Simulation AB, 2012):

$$\Delta p_{stack} = \sum_i \Delta p_{stack_i} = \sum_i (p_{stack_{i+1}} - p_{stack_i}) \quad (8)$$

jossa

Δp_{stack} = tunnelin savupiippupaine (Pa)

Δp_{stack_i} = savupiippupaine tunnelin osassa i (Pa)

$p_{stack_{i+1}} = p_{stack_i} e^{-g\Delta h_i / (R(T_i + 273,15))}$ = staattinen paine tunnelin osassa $i+1$ (Pa)

p_{stack_i} = staattinen paine tunnelin osan i vasemmassa päässä (Pa)

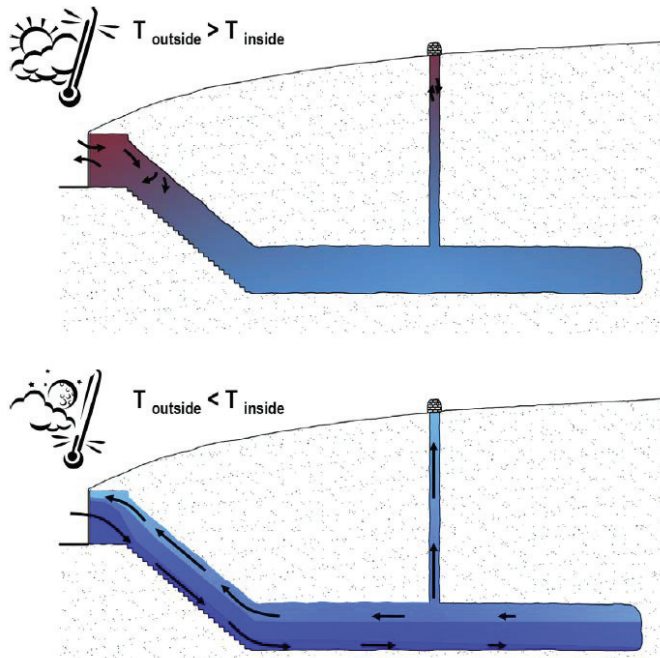
Δh_i = korkeusero tunnelin osassa i (m)

g = 9,80665 = gravitaatiokiihtyvyys (m/s²)

T_i = ilman lämpötila tunnelin osassa i (°C)

R = 287 = kaasuvakio ilmalle (J/kgK)

Kuva 6 havainnollistaa savupiippuefektin vaikutusta tilanteissa, jossa ulkoilman lämpötila on a) suurempi ja b) pienempi kuin tunnelin ilman lämpötila. Kun ulkoilman lämpötila on suurempi kuin tunnelin ilman lämpötila, estää kylmempi ja raskaampi sisäilma kuumemman ulkoilman sisäänvirtauksen tunneliin. Sitä vastoin, kun ulkoilman lämpötila on useita asteita alle tunnelin ilman lämpötilan, aiheuttaa kylmempi ja raskaampi ulkoilma jatkuvan sisäänvirtauksen tunneliin suuaukkojen alimmista osista. Samanaikaisesti tunnelin lämpimämpi ilma virtaa ulos tunnelin suuaukkojen ylemmistä osista. Kylmä ilmavirtaus jatkuu niin kauan kunnes kylmä ilma on syrjäyttänyt kaiken lämpimämmän ilman sekä jäädyttänyt riittävästi tunnelin seinämärakenteet. (Mazarrón, et al., 2015.)



Kuva 6. Tunnelin savupiippuefektin havainnollistaminen (Mazarrón, et al., 2015).

2.3.2 Junaliikenteen aiheuttama ilmavirtaus

Aerodynaamisesti tarkasteltuna junaa voidaan pitää väljänä mäntänä, joka työntää ilmaa edellään, ja imee takanaan. Tämä aiheuttaa junan yli ns. mäntäpaineen, joka voidaan ilmaista seuraavan kaavan avulla (EQUA Simulation AB, 2012):

$$\Delta p_{piston} = \sum_i \sum_j \frac{\rho_i}{2} A_{V-j} \left\{ \left[\frac{C_{DFV-j}}{A_i} + \frac{(2A_i - A_{V-j})}{(A_i - A_{V-j})^2} \right] N_{front-ij} + \left[C_{DBV-j} \frac{A_i}{(A_i - A_{V-j})^2} - \frac{2}{A_i - A_{V-j}} \right] N_{back-ij} \right\} (v_{V-ij} - v_i) |v_{V-ij} - v_i| \quad (9)$$

jossa

- Δp_{piston} = mäntäpaine (Pa)
- ρ_i = keskimääräinen ilman tiheys tunnelin osassa i (kg/m³)
- A_{V-j} = junan j poikkileikkaus pinta-ala (m²)
- A_i = tunnelin poikkileikkaus pinta-ala osassa i (m²)
- C_{DFV-j} = Ilmanvastuskerroin junan j etuosassa
- C_{DBV-j} = $\frac{0,029}{\sqrt{0,5\lambda_{VS-j}l_{V-j}p_{V-j}/4A_{V-j}}} =$ ilmanvastuskerroin junan j takaosassa
- $N_{front-ij}$ = tunnelin osassa i samanaikaisesti olevien junien j etuosien lukumäärä
- $N_{back-ij}$ = tunnelin osassa i samanaikaisesti olevien junien j takaosien lukumäärä
- v_{V-ij} = junan j nopeus tunnelin osassa i , positiivinen arvo jos suunta vasemmalta oikealle (m/s)
- v_i = keskimääräinen ilman nopeus tunnelin osassa i , positiivinen arvo jos suunta vasemmalta oikealle (m/s)

Tunnelissa kulkevan junan liikettä vastustavat painehäviökomponentit ovat tunnelin seinämän kitkasta aiheutuva painehäviö Δp_{frict} , ja junan kitkan aiheuttama painehäviö Δp_{fricv} (EQUA Simulation AB, 2012).

$$\Delta p_{frict} = - \sum_i \frac{\rho_i \lambda_{Ti}}{2d_i} \left[\left(l_i - \sum_j l_{V-ij} \right) v_i |v_i| - \sum_j \frac{l_{V-ij}}{(1 - A_{V-j}/A_i)^3} \left(\frac{A_{V-j}}{A_i} v_{V-ij} - v_i \right) \left| \frac{A_{V-j}}{A_i} v_{V-ij} - v_i \right| \right] \quad (10)$$

jossa

- Δp_{frict} = tunnelin seinämän kitkasta aiheutuva painehäviö (Pa)
- λ_{Ti} = kitkakerroin tunnelin seinämälle osassa i
- d_i = tunnelin hydraulinen halkaisija osassa i (m)
- l_i = tunnelin osan i pituus (m)
- l_{V-ij} = junan j pituus tunnelin osassa i (m)

$$\Delta p_{fricv} = \sum_i \sum_j \frac{\rho_i \lambda_{V-j} l_{V-ij} p_{V-j}}{8A_i (1 - A_{V-j}/A_i)^3} (v_{V-ij} - v_i) |v_{V-ij} - v_i| \quad (11)$$

jossa

Δp_{fricv} = junan kitkan aiheuttama painehäviö (Pa)

λ_{V_j} = $\lambda_{VS_j} + \frac{c_{DTV_j}}{4l_{V_j}p_{V_j}}$ = junan j pintakitkakerroin

λ_{VS_j} = junan j ilmanvastuksesta riippuva kitkakerroin

c_{DTV_j} = junan poikkileikkausalalla painotettu ilmanvastuskerroin junalle j (m²)

l_{V_j} = junan j pituus (m)

p_{V_j} = junan j ympärysmitta (m)

IDA Tunnel –ohjelmassa junan työntämä ilmavirta käsitellään kokoonpuristumattomana, vaikka todellisuudessa ilma puristuu mäntäefektin vaikutuksesta hieman ”kasaan”. Aiemmin yhtälössä 5 todettiin, että ilman tiheys on lämpötilan ja paineen funktio, mikä tarkoittaa, että ilma on kokoonpuristuvaa. Myös IDA Tunnel-ohjelmassa ilma käsitellään koko verkoston tasolla kokoonpuristuvana, mutta tunnelissa solmupistetasolla ilma on kokoonpuristumatonta, jolloin junien liikkeet eivät paikallisesti vaikuta ilman tiheyteen. Solmupistetasolla tiheys määritetään tällöin seuraavasti (EQUA Simulation AB, 2012):

$$\rho_i = \frac{p_i}{R(T_i + 273,15)} \quad (12)$$

jossa

ρ_i = keskimääräinen ilman tiheys tunnelin osassa i (kg/m³)

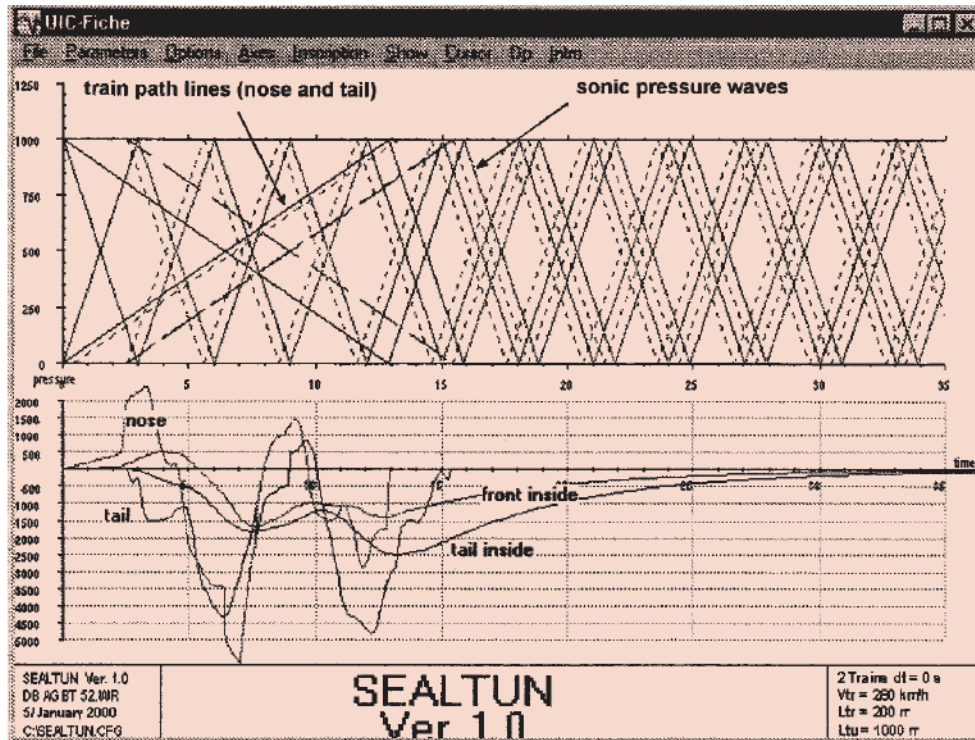
R = 287 = kaasuvakio ilmalle (J/kgK)

p_i = keskimääräinen ilman staattinen paine tunnelin osassa i , keskiarvo joka on laskettu staattisista paineista osissa i ja $i+1$ (Pa)

T_i = ilman lämpötila tunnelin osassa i (°C)

IDA Tunnel -ohjelman kehittäjät puhuvat tällöin ”heikosti kokoonpuristuvasta ilmasta”. Tämä yksinkertaistus sopii hyvin tunnelin ilmavirtojen ennustamiseen, mutta sitä ei voi tarkasti hyödyntää nopeasti etenevien paineaaltojen etenemisen mallintamisessa, mikä nousee tärkeään rooliin varsinkin suurilla nopeuksilla liikkuvien junien aerodynamiikan hallinnassa. Heikosti kokoonpuristuvan ilman laskennassa otetaan siis huomioon ainoastaan junan aiheuttama mäntäpaine. Paineaaltojen superpositiosta aiheutuvaa paineennousua ei oteta huomioon. (EQUA Simulation AB, 2013.)

Todellisuudessa juna synnyttää tunnelissa kulkiessaan lähes äänennopeudella eteneviä paineaaltoja, jotka heijastuvat tunnelin suuaukoista sekä risteyskohdista ja näin kulkeutuvat tunnelissa useita kertoja edestakaisin junan ohitse ennen vaimenemistaan (Gawthorpe, 2000). Tällöin tunneliin muodostuu monimutkainen useasta paineaallosta koostuva painekuvio, jossa superpositio aiheuttaa suurempia paineiskuja kuin pelkkä junan aiheuttama mäntäpaineisku saisi yksin aikaiseksi. Kun tunneliverkostossa kulkee lisäksi useita junia samanaikaisesti, on junien aiheuttama yhteisvaikutus painekenttään huomioitava. Useasta samanaikaisesta paineaallosta koostuvaa painekuviota havainnollistetaan kuvassa 7.



Kuva 7. Paineaaltojen muodostuminen tunnelissa. Kuvassa on esitetty kahden junan aiheuttama yhteispainekuvio, kun junat kulkevat yhden kilometrin pituisen tunnelin läpi. (Gawthorpe, 2000.)

Tunnelin paineaaltojen laskentaan on myös olemassa kaupallisia simulointiohjelmistoja. Esimerkiksi Länsimetron tunnelin painetasoja on aiemmin tutkittu ThermoTun-simulointiohjelmalla (ThermoTun, 2016). Tähän palataan tarkemmin kappaleessa 5.2.5.

3 Metrotunneliverkoston olosuhteisiin liittyvät viranomaismääräykset Suomessa

3.1 Olosuhdehallinnan ohjeistus

Junaliikennekäytössä olevien tunneleiden suunnittelua, rakentamista ja turvallisuutta ohjeistavat Suomessa esimerkiksi rautatielaki, EU-direktiivit (96/48/EY, 2001/16/EY ja 2004/50/EY), Liikenneviraston radan suunnitteluohje, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL), Rautateiden maanrakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RYMTL) sekä Ratatekniset ohjeet (RATO, osa 18). (Ratahallintokeskus, 2008.)

Suomen metrohankkeita koskevat myös monet muut erilaiset lait, asetukset, viranomaismääräykset ja -ohjeet. Esimerkkeinä näistä ovat Maankäyttö ja rakennuslaki (MRL), Pelastuslaki, Työturvallisuuslaki, Suomen Rakentamismääräyskokoelma (RakMK) sekä Metrosuunnittelun käsikirja (MSK). (HKL, 2008.)

Erityisesti HKL:n julkaisema Metrosuunnittelun käsikirja (MSK) on tarkoitettu metrotunnelien ja metroasemien suunnittelun ohjeeksi. Lisäksi Länsimetro-hankkeessa käytännön suunnittelutyötä ohjaavat Länsimetron omat suunnitteluohjeet. Olosuhdevaatimusten näkökulmasta molemmissa ohjeistuksissa määritellään tavoitteet metrotunnelin sekä metroasemien olosuhteille, sekä ohjeistetaan millä suunnitteluratkaisuilla haluttuihin olosuhteisiin päästään. Lisäksi RATO, eli ratatekniset ohjeet, sisältää mitoitusperusteita junaliikennekäytössä olevien tunneleiden lämpötekniselle ja aerodynaamiselle mitoitukselle.

3.2 Metrotunnelin olosuhteiden suunnittelu

3.2.1 Lämpötekkinen suunnittelu

Junaliikennekäytössä olevien tunneleiden lämpötekkinen suunnittelun tärkeimpänä lähtökohtana Suomen olosuhteissa voidaan pitää jäätyminen ehkäisyä (Ratahallintokeskus, 2008). Tunnelien jäätyminen on haitallista siellä olevalle tekniikalle sekä rakenteille. Tekniikan ja rakenteiden jäätymisvauriot voivat puolestaan haitata tunnelin liikennöintiä sekä turvallisuutta tunnelissa.

Kuitenkin esimerkiksi Metrosuunnittelun käsikirja ohjeistaa, että tunneleihin ei tule varsinaisia lämmitysjärjestelmiä (HKL, 2008). Näin ollen ainoina lämmönlähteinä tunnelissa on maaperään varautuneen lämmön lisäksi junista, laitteista ja ihmisistä aiheutuvat lämpökuormat. Tunnelin lämpötilaa voidaan kuitenkin hallita esimerkiksi paineentasauskuilujen säleikköjen osittaisella sulkemisella pakkaskaudella, lämpökatkojen käytöllä (ovet, lämpöverhot) sekä ilmanvaihtopuhaltimien oikealla käytöllä. Lisäksi tunnelin pakkaselle herkkä tekniikka tai rakenteet voidaan tarpeen mukaan suojata erikseen esim. saattolämmityksen tai eristyksen avulla. (Ratahallintokeskus, 2008.)

Todennäköisesti tehokkain vaihtoehto tunnelin kylmyydenhallintaan talvisin on paineentasauskuilujen säleikköjen osittainen sulkeminen. Maanpinnalla paineentasauskuilujen yläpäässä on säädettävissä olevat sääsäleiköt, joita kuristamalla voidaan pienentää kylmän ilman sisäänvirtausta tunneliin talvella (Rossi, et al., 2012). Säleiköt voidaan ohjata sulkeutumaan ulkolämpötilan kylmetessä alle asetetun rajan (HKL, 2008).

3.2.2 Ilmanvaihto

Metrosuunnittelun käsikirja ohjeistaa, että tunneleihin ei tule koneellista ilmanvaihtojärjestelmää. Metrotunneliverkoston yleisilmanvaihto toimii junien synnyttämän mäntävaikutuksen avulla. Normaalitylanteessa ratatunnelissa mitoitusnopeudella liikkuva juna muodostaa työntö- ja imuvirtauksia, jotka saavat aikaan riittävän ilmanvaihdon. Tulo- ja poistoilmareitteinä toimivat kuilut sekä tunnelin suuaukot. (HKL, 2008.)

RATO puolestaan ohjeistaa, että tunneleissa voidaan tarpeen vaatiessa käyttää koneellista ilmanvaihtoa ilmanlaadun tai lämpötilojen hallintaan. Tällöin ilmanvaihtoon käytetään ensisijaisesti tunneleiden pitkittäisilmanvaihtoon tarkoitettuja, suuren työntövoiman aksiaalipuhaltimia. Puhaltimet asennetaan äänenvaimentimin ilman kanavointia. Lisäksi puhaltimien tulee olla puhallussuunaltaan käännettäviä ja työntövoiman tulee olla yhtä suuri molempiin suuntiin. Koneellista ilmanvaihtoa tulee käyttää vain tarpeen mukaan. Puhaltimien turha käynti tulee estää. (Ratahallintokeskus, 2008.)

Tulipalotilannetta varten tunnelit varustetaan koneellisella savunpoistojärjestelmällä. Rata-tunnelin savunpoisto tapahtuu pystykuiluihin sijoitettavilla aksiaalipuhaltimilla, jotka ovat vaihtosuuntaisia ja pyörimisnopeuden säädöllä varustettuja. Yhden savunpoistopuhaltimen kapasiteetti on suuruusluokaltaan n. 10 m³/s. Näin voidaan saavuttaa ratatunnelissa vaadittava savunpoiston mitoitusnopeus 3 m/s. (HKL, 2008.)

Metrotunneliverkostossa ilmavirtojen tärkeimpinä kulkureitteinä ovat tunnelista maanpinnalle johtavat kuilurakenteet. Kuiluja käytetään tunnelin paineentasaukseen, savunpoistoon, yleisilmanvaihtoon sekä hätäpoistumisteinä. Paineentasauskäytössä kuilujen tehtävä on vaimentaa junien aiheuttamia paine-iskuja asemilla sekä junan sisällä. Yleisilmanvaihdossa kuilut toimivat tulo- ja poistoilmareitteinä. Kuilut sijoitetaan maanalaisille metroasemille aseman kumpaankin päähän mahdollisimman lähelle laituria. Jos kahden maanalaisen metroaseman välinen etäisyys on yli 700 m, tulee paineentasauskuilu sijoittaa myös asemien välillä olevalle tunneliosuudelle. Paineentasauskuilujen ohjeellinen poikkipinta-ala on 20 m², ja ehdoton minimi 15 m². (HKL, 2008.)

Niin kuin jo kohdassa 3.2.1 käytiin läpi, on paineentasauskuilujen yläpäässä maanpinnalla säädettävät sääsäleiköt, joita kuristamalla voidaan pienentää kylmän ilman sisäänvirtausta tunneliin. Junien liikennöinnin aikana säleikköjen on kuitenkin oltava aina edes osittain auki, jotta riittävä paineentasaus varmistetaan. Yö-aikana, kun junat eivät kulje, on säleiköt mahdollista sulkea kokonaan. Näin voidaan hillitä lämpötilan putoamista tunnelissa kovalta pakkaskaudella.

Jos junien kulkusuunnat on erotettu omiin tunneleihinsa (niin kuin Länsimetrossa on tehty), kulkee tunneleita tällöin kaksi rinnakkain. Rinnakkaiset tunnelit on yhdistetty toisiinsa 120-150 metrin välein olevilla yhdystunneleilla, jotka toimivat huolto- ja pelastusyhteyksinä (Rossi, et al., 2012). Yhdystunneleita voidaan tarvittaessa käyttää myös ilmanvaihtoon ja paineentasaukseen, ja niiden virtauspinta-alaa voidaan esimerkiksi ovien avulla muuttaa (HKL, 2008).

3.2.3 Aerodynaaminen mitoitus

Metrotunneliverkoston aerodynaamisen suunnittelun osa-alueita ovat ilman virtausnopeuksien, paineenvaihteluiden, maksimaalisten painekuormien sekä aerodynaamisen vastuksen hallinta. Nämä toimivat mitoituserusteina paineentasauskuilujen mitoitukseen sekä rakenteiden aerodynaamiseen muotoiluun ja vaimennusrakenteiden suunnitteluun. Tässä kappaleessa tarkastellaan kutakin osa-aluetta tarkemmin RATON ja MSK:n ohjeistuksien kautta.

1. Ilman virtausnopeus

RATON ohjeistuksien mukaan ilman virtausnopeus metroasemilla tulee rajoittaa sellaisiin maksimiarvoihin, että se ei aiheuta ihmisille kohtuutonta haittaa. Ilmanvirtausnopeus ei saa ylittää arvoa 5 m/s oleskelualueilla. Poikkeustilanteissa, tai vain huoltohenkilöstölle tarkoitetuissa tiloissa ilman virtausnopeus saa hetkellisesti nousta arvoon 10 m/s. (Ratahallintokeskus, 2008.)

MSK:ssa ilmavirran nopeuksien tavoitearvoja ohjataan tiukemmin. Laituritasojen tavoitteelliseksi ilmavirran nopeudeksi ohjeistetaan 3 m/s, ja porraskuiluissa sekä lippuhalleissa 2 m/s. (HKL, 2008.)

2. Paineenvaihtelut ja maksimaaliset painekuormat

Tunneliverkostossa paineenvaihteluiden ja maksimaalisten painekuormien hallinta on tärkeää matkustusmukavuuden, rakenteiden painekuormamitoituksen sekä paineaaltojen aiheuttamien meluhaittojen vuoksi. RATO määrittelee paineenvaihtelun ja painekuormien mitoituksesta huomattavasti tarkemmin kuin MSK.

Junassa matkustavat ihmiset altistuvat liikkuvan junan kohtaamille paineenvaihteluille, joissa paineenvaihtelun amplitudi (positiivisen ja negatiivisen paineen huippuarvojen ero), paineen muutosnopeus (aika huipusta huippuun) sekä paineenvaihteluiden frekvenssi vaikuttavat siihen, miten paineenmuutokset koetaan. Näistä merkittävin on paineenvaihtelun amplitudi, jonka suuruutta on rajoitettava junan tunnelissa kulkemisen kokonaisaikana, sekä 1-4 sekunnin pituisen mielivaltaisesti valitun tarkastelujakson aikana. Tarkastelujakson valinta perustuu ihmisen korvan rakenteeseen ja kykyyn reagoida äkillisiin paineenvaihteluihin. (Ratahallintokeskus, 2008.)

RATO:ssa paineenvaihtelun amplitudille on määritelty seuraavat raja-arvot:

- a) Tarkasteluvälinä 1s: Max $\Delta P = 0,5$ kPa
- b) Tarkasteluvälinä 4s: Max $\Delta P = 1,5$ kPa usein toistuvissa paineenvaihteluissa ja 3,0 kPa harvoin toistuvissa paineenvaihteluissa
- c) Tarkasteluvälinä kokonaisaika, jonka juna on tunnelissa : Max $\Delta P = 10$ kPa

Maksimaalisilla painekuormilla puolestaan tarkoitetaan suurinta mahdollista junien aiheuttamaa ylipaine-, sekä alipainekuormaa. Tunneliverkoston rakenteet ja laitteet tulee mitoittaa näille kuormille, ja kuormat on lähtökohtaisesti analysoitava tunnelikohtaisesti. Jos tunnelikohtaista painekuormien määrittäystä ei tehdä, määrittää RATO painekuormille valmiit mitoituservot. Esimerkiksi yksiraiteiselle tunnelille, jossa junan maksiminopeus on alle 160 km/h, on mitoittavat yli-, ja alipainekuormat ± 4 kPa. (Ratahallintokeskus, 2008.)

Paineenvaihteluiden ja maksimaalisten painekuormien suuruuksiin vaikuttavat eniten seuraavat parametrit: junan mitoitusnopeus, junan ja tunnelin poikkileikkausalojen suhde, junan ja tunnelin pituus sekä paineentasauskuilujen mitoitus, sijoitus ja lukumäärä. Lisäksi junan sisällä koettaviin paineenvaihteluihin vaikuttaa myös junan tiiviys. (Ratahallintokeskus, 2008.)

Paineentasauskuilujen mitoituksella, sijoituksella tai lukumäärällä ei voida vaikuttaa yksittäisten paineaaltojen amplitudeihin, mutta niillä voidaan merkittävästi alentaa ilman virtausnopeuksia ja superpositiosta aiheutuvia paineen huippuarvoja (Gawthorpe, 2000). Poikkileikkaukseltaan liian pieni kuilu on tehoton. Liian suuri kuilu voi puolestaan aiheuttaa koko paineaallon heijastumisen. (Ratahallintokeskus, 2008.)

Tunneliverkostossa paineen huippuarvoja voidaan alentaa myös yhdystunnelien, erilaisten syvennysten sekä rakenteiden aerodynaamisen muotoilun avulla. Lisäksi suuaukkojen vaimennusrakenteilla voidaan merkittävästi pienentää paineaaltojen ympäristölle aiheuttamia meluhaittoja. (Ratahallintokeskus, 2008.)

3. Aerodynaaminen vastus

Ilmanvastus tunnelissa on huomattavasti suurempi kuin vapaassa ilmatilassa. Ilmanvastus tulee tunneliverkostossa rajoittaa sellaiseksi, että liikkuvan kaluston vetoteho on riittävä halutun junanopeuden ylläpitämiseksi tunnelissa (Ratahallintokeskus, 2008). Asemien väleissä olevien kuilujen paras sijoituspaikka on asemavälin keskivaiheilla, koska tällöin junan ilmanvastus on molempiin suuntiin sama (HKL, 2008).

3.2.4 Ilmanlaatu

MSK:ssa mainitaan, että tunneli ja laituritilojen ilmanlaadulle ei voida asettaa puhtauskriteereitä tunnelipölyn takia. Näin ollen Helsingin metrossa tai Länsimetrossa ei tunnelin hiukkaspitoisuudelle ole tällä hetkellä olemassa mitoitettavaa raja-arvoa. Pienhiukkastasoja on kuitenkin aiemmin tutkittu Helsingin metrossa vuonna 2004. Rautatientorin, Sörnäisten, ja Siilitien metro-asemilla sekä metrovaunuissa mitattiin tällöin hiukkasten massa- ja lukumääräpitoisuuksia (Aarnio, et al., 2006).

Mittauksissa havaittiin, että Helsingin metrossa pienhiukkasten massapitoisuudet olivat huomattavasti alhaisempia kuin Tukholmassa tai Lontoossa. Toisaalta pienhiukkasten pitoisuudet olivat maanalaisilla metroasemilla selvästi korkeammat kuin yleensä ulkoilmassa Helsingissä. Lisäksi metrossa hiukkasten koostumus poikkesi huomattavasti ulkoilman hiukkasista. Hiukkasmassassa havaittiin rautaa, mangaania, kromia, nikkeliä ja kuparia, mikä viittaa siihen, että metrossa pyörien, raiteiden, virtakiskon sekä virroittimen kulumien ovat todennäköisiä hiukkasten lähteitä. (Aarnio, et al., 2006.)

3.3 Maanalaisen metroaseman olosuhteiden suunnittelu

Verrattuna tunneleihin, maanalaisten asemien olosuhdesuunnittelu muistuttaa hieman enemmän normaalin rakennuksen suunnittelua. Esimerkiksi lämmityksen ja ilmanvaihdon suunnittelussa voidaan MSK:n ohjeiden lisäksi soveltaa myös Suomen rakentamismääräyskokoelmaa tai Sisäilmastoluokitusta. Metroaseman lämpötilavaatimukset sekä sisäilmaolosuhteet on määriteltävä tilakohtaisesti. MSK:ssa määritellyt metroaseman tilakohtaiset tavoitetasot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Metroaseman tilakohtaiset lämpötilat ja sisäilmaolosuhteet (HKL, 2008).

	Tunnelista erotettu laiturin, lip- puhalli ja liukuporras- kuilu	Tunneliin yhteydessä oleva laiturin, lip- puhalli ja liukuporras- kuilu	Kioskit	Porrashuoneet	Tekniset tilat (akkuhuone, GIDS-laitetila, ATC-laitetila, muut sähkötekniset tilat)	Varastot	Asetinlaitehuone	Telelaitetila
• huonelämpötila talvella	min 10 °C	min 5 °C	20-23 °C	10-23 °C	17-30 °C	17-27(35) °C	20-22 °C	20-22 °C
• huonelämpötila kesällä	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	22-27°C	10-27(35) °C	17-30 °C	17-27(35) °C	20-22 °C	20-22 °C
• ilman suhteellinen kosteus talvella (minimi)	ei kostutusta (=n.5%)	ei kostutusta (=n.5%)	ei kostutusta (=n.5%)	ei kostutusta (=n.5%)	ei kostutusta (=n.5%)	ei kostutusta (=n.5%)	kostutus (45-50%)	ei kostutusta (=n.5%)
• ilman suhteellinen kosteus kesällä (maksimi)	ei kuivatusta (=n.80%)	ei kuivatusta (=n.80%)	ei kuivatusta (=n.80%)	ei kuivatusta (=n.80%)	ei kuivatusta (=n.80%)	ei kuivatusta (=n.80%)	kuivatus (45-50%)	ei kuivatusta (=n.80%)
• äänitaso (maksimi kesällä), kalustetussa huoneessa	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)	43 dB(A)
• ilmavirta	(5 dm ³ /s)/m ² tai (6 dm ³ /s)/hlö	(5 dm ³ /s)/m ² tai (6 dm ³ /s)/hlö	(5 dm ³ /s)/m ² tai (6 dm ³ /s)/hlö	0,5 l/h	lämpökuormien mukaan	(0,5 dm ³ /s)/m ²	lämpökuormien mukaan	lämpökuormien mukaan
• jäähdytys	ei	ei	tapauskoh- tainen har- kinta	ei	tapauskoh- tainen har- kinta	ei	kyllä	kyllä
• tilakohtainen lämpötilasäätö	kyllä	ei	ei	ei	kyllä	ei	kyllä	kyllä
• muilta osin nou- datettava sisäil- maluokka	S3	-	S3	S3	S3	S3	S3	S3

(35) °C = Sisälämpötila ei saa missään olosuhteissa olla yli +35 °C

Tunneliverkoston näkökulmasta oleellista on tarkastella asemalaituria, koska aseman tiloista se on ensimmäisenä yhteydessä tunneliin. Taulukosta 1 nähdään, että asemalaiturin minimilämpötila talvella on +5°C, jos laiturin on suoraan yhteydessä tunneliin ja +10°C, jos asemalaituri on erotettu tunnelista esimerkiksi metrolaituriovilla. Tunnelista erotetun asemalaiturin lämpötiloja on helpompi hallita, joten sille voidaan asettaa korkeammat tavoitteet myös lämpötilansäädön osalta. Lisäksi taulukosta 1 havaitaan, että mitoitusilmavirta asemalaitureille on 5 (dm³/s)/m².

Tilojen lämmitysjärjestelmät suunnitellaan siten, että saavutetaan tilakohtaiset tavoitelämpötilat sekä estetään voimakkaat lämpötilan vaihtelut ja vedon tunne (HKL, 2008). Asemien lämpöhäviölaskennassa ja LVI-järjestelmien mitoituksessa käytetään ulkoilman mitoituslämpötilana -26°C, ja ratatunnelin ilman mitoituslämpötilana 0°C (Länsimetro Oy, 2013).

4 Simulointi-case: Länsimetro vaihe 2

4.1 Tutkimuskohteen esittely

Länsimetro-hankkeessa Helsingin metroa laajennetaan länteen kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan 8 uutta metro-asemaa, ja toisessa vaiheessa, jota tämän työn empiirinen osuus käsittelee, rakennetaan 5 asemaa lisää. Länsimetro kulkee koko 21 kilometrin matkan maan alla kahdessa rinnakkaisessa tunnelissa. Ensimmäisen vaiheen tunneliosuuden pituus on 14 kilometriä ja toisen vaiheen 7 kilometriä. (Länsimetro Oy, 2016.)

Länsimetro vaihe 2:n viisi rakennettavaa asemaa lännestä itään päin lueteltuna ovat Kivenlahti, Espoonlahti, Soukka, Kaitaa ja Finnoo. Lisäksi Länsimetro vaihe 2:ssa rakennetaan maanalainen metrovarikko Sammalvuoreen. (Länsimetro Oy, 2016.)



Kuva 8. Länsimetro kartalla. Länsimetro vaihe 2 sijaitsee välillä Kivenlahti-Finnoo. (Länsimetro-kuvapankki, 2015.)

Länsimetro-hankkeen tarkoituksena on nostaa joukkoliikenteen suorituskykyä pääkaupunkiseudun kasvavan väestömäärän tarpeisiin. Liikenne-ennusteiden mukaan Länsimetro vaihe 2 lisää joukkoliikennematkoja noin 53000 matkalla vuorokauden aikana vuonna 2035, mikä on noin 0,5 % pääkaupunkiseudun joukkoliikennematkoista. Näistä uusista joukkoliikennematkoista noin 40 % on peräisin jalan tai pyörällä tehdyistä matkoista ja noin 60 % henkilöautolla tehdyistä matkoista. Taulukossa 2 esitetään Länsimetro vaihe 2:n asemien matkustajamääräennusteet vuodelle 2035. (Rossi, et al., 2012.)

Taulukko 2. Länsimetro vaihe 2:n matkustajamääräennusteet vuodelle 2035 (Rossi, et al., 2012).

	Finnoo	Kaitaa	Soukka	Espoonlahti	Kivenlahti
Matkustajia vuorokaudessa	13500	8800	8900	9300	12200
Matkustajia aamun ruuhkatunnin aikana	2160	1100	1300	1350	1750

4.2 Tavoitteena tunneliverkoston talviaikainen lämpötilanhallinta

Olosuhdesimulointien tarve Länsimetro vaihe 2 –hankkeessa liittyy metrotunnelin ja metroasemien talviaikaiseen lämpötilanhallintaan. Tunnelissa sekä metroasemilla olevan tekniikan ja rakenteiden toiminnan kannalta on tärkeää selvittää, kuinka kylmäksi tunneliverkosto voi kovan pakkasjakson aikana jäähtyä. Mahdollisimman kustannusoptimaalisen ja tarpeenmukaisen pakkassuojauksen suunnittelu edellyttää tunnelin lämpötekniisen käyttäytymisen selvittämistä dynaamisen simuloinnin avulla.

Länsimetron tunnelin LVI-tekniikan pakkassuojauksen mitoituksen suunnittelu oli tärkein motiivi, jonka perusteella tämän työn tunnelisimulointeja lähdettiin tekemään. Länsimetro vaihe 2:n tunnelissa kulkee esimerkiksi koko tunneliverkoston pituinen palovesiputki, jonka tarkoituksena on palvella kaikkien Länsimetro vaihe 2:n asemien palonsammutusjärjestelmiä. Jos tunnelissa kulkeva palovesiputki jäätyy, vaarantaa se kaikkien metroasemien palonsammutusjärjestelmien toiminnan, mikä on huomattava turvallisuusriski. Lisäksi palovesiputki saattaa jäätyessään haljeta, jolloin tunneliin vuotaa runsaasti vettä. Palovesiputken sulanapitoratkaisuja ovat eristys, lämmitys, veden kierrätys tai jokin edellä mainittujen yhdistelmä. Palovesiputki on kuitenkin pitkä, sillä se kiertää edestakaisen rengasmaisen lenkin koko tunneliverkoston läpi, jolloin pituutta putkelle kertyy yhteensä 14 km. Näin ollen mikä tahansa palovesiputken sulanapitojärjestely aiheuttaa suuren investointikustannuksen. Jos tunnelin lämpötekniinen käyttäytyminen kovan pakkasjakson aikana tunnetaan, on palovesiputkelle mahdollista suunnitella mahdollisimman kustannusoptimaalinen sulanapitojärjestely kovan pakkasjakson varalle. (Ekström, 2016.)

Eräs toinen esimerkki Länsimetron tunneleissa kulkevasta tekniikasta on junan kulkua varmistavat turvalaitteet, eli ns. asetinlaitteet, joilla ohjataan vaihteita, opastimia, junan pakkopysäytyslaitteita sekä raiteen vapaanaolon valvontajärjestelmää. Asetinlaitteella varmistetaan turvalliset kulkutiet junille paikasta A paikkaan B. Jään mahdollinen kertyminen asetinlaitteisiin aiheuttaa huomattavaa haittaa metroliikenteelle. Esimerkiksi vaihde jäätyessään ei käänny jolloin vaihde tulee sulattaa. Maanpäällisissä vaihteissa käytetään lämmitysvastuksia, mutta tunnelissa lämmitysvastuksia ei lähtökohtaisesti käytetä. Lisäksi opastimien valot saattavat jäädä näkymättä, mikäli linssin eteen kertyy jäätä. Epäselvä tai puuttuva opaste tulkitaan aina SEIS-opasteeksi eli turvalliseen suuntaan, mikä näin ollen myös haittaa liikennettä. (Ruohomäki, 2016.)



Kuva 9. Länsimetron tunnelin tekniikkaa. Kuvassa tunnelin turvalaitteita (vasemmalla opastin ja etualalla keltainen pysäytysmagneetti) sekä oikealla raiteen vieressä kulkeva kouru, johon sijoitetaan tunnelin palovesiputki. (Ruohomäki, 2016.)

Poikkeuksellisen kylmän pakkasjakson aikana Länsimetron tunnelin lämpötilan putoamista voidaan hidastaa paineentasauskuilujen säleikköjen osittaisella sulkemisella. Säleikköjen kuristaminen kuitenkin häiritsee tunnelin aerodynaamista toimintaa, mikä saattaa ilmetä haitallisen suurina ilmavirran nopeuksina metroasemalla tai kovina yli- ja alipaineiskuina tunnelissa. Paineaallot voivat aiheuttaa metrossa matkustaville ihmisille huomattavaa epämukavuutta ja joissain tapauksissa myös terveydellisiä ongelmia kaikkein herkimmille yksilöille (Gawthorpe, 2000). Lisäksi paineaallot sekä suuret ilmavirran nopeudet saattavat aiheuttaa meluhaittoja tunnelin ympäristöön, lisätä junan kulkuvastusta tunnelissa sekä vaurioittaa tunnelin rakenteita ja tunnelissa kulkevaa tekniikkaa (Ko, et al., 2012). Aerodynaamiset ongelmat on otettava tarkasti huomioon silloin, kun tunnelin lämpötiloja halutaan nostaa tunnelin virtausaukkoja pienentämällä.

Simuloinneilla on tarkoitus selvittää säleikköjen kuristamisen lämpötiloja kohottava vaikutus sekä samalla tutkia, kuinka paljon säleikköjen kuristaminen nostaa tunnelin paineiskuja ja ilmavirran nopeuksia. Näin poikkeuksellisen kylmälle pakkasjaksolle voidaan valita sellainen säleikköjen vakioasento tai ohjaus, jolla lämpötila tunnelissa putoaa mahdollisimman vähän kuitenkin paineiskujen ja ilmavirran nopeuksien raja-arvoja ylittämättä.

4.3 Mitoittavan pakkasjakson määrittäminen

Länsimetron simulointeja varten täytyy valita mitoittava pakkasjakso, jolla metrotunnelin äärimmäisen kylmiä olosuhteita tutkitaan sekä kuilujen säleikköjen asentoja vertaillaan. Mitoittavan pakkasjakson arvioimiseksi voidaan vertailla Ilmatieteenlaitoksen lämpötilatilastoja Helsingin alueella.

Kun tutkitaan tilastoja viimeisen 50 vuoden ajalta, voidaan havaita, että kaikkein kylmintä Helsingissä on ollut vuoden 1987 tammikuussa. Tällöin kuukauden keskilämpötila oli $-16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kylmimmän peräkkäisen 7 päivän jakson keskilämpötila $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vuoden 1987 jälkeen on Helsingissä esiintynyt melko kylmiä pakkasjaksoja myös vuosina 1994, 1996, 2003, 2010, 2011 ja 2016. Taulukossa 3 on listattu em. vuosien kylmimmän kuukauden

keskilämpötila, sekä kylmimmän peräkkäisen 7 päivän jakson keskilämpötila. Lisäksi taulukkoon on merkitty tammikuun ja helmikuun keskilämpötilojen keskiarvo vuosilta 1981-2010. (Ilmatieteenlaitos, 2016.)

Taulukko 3. Viimeisen 30 vuoden aikana mitatut kylmimmät pakkasjaksot Helsingissä.

Vuosi	Kylmin kuukausi	Kylmimmän kuukauden keskilämpötila	Kylmimmän peräkkäisen 7 päivän jakson keskilämpötila
1987	Tammikuu	-16,5 °C	-31,0 °C
1994	Helmikuu	-11,6 °C	-18,1 °C
1996	Helmikuu	-9,2 °C	-16,0 °C
2003	Tammikuu	-8,5 °C	-23,0 °C
2010	Tammikuu	-10,4 °C	-17,1 °C
2011	Helmikuu	-9,9 °C	-19,9 °C
2016	Tammikuu	-8,8 °C	-18,3 °C
Keskiarvo 1981-2010	Tammikuu	-3,9 °C	
Keskiarvo 1981-2010	Helmikuu	-4,7 °C	

Kun taulukosta 3 tarkastellaan kylmimpien peräkkäisten 7 päivän jaksojen keskilämpötiloja, havaitaan, että viimeisen 30 vuoden aikana on ollut yksi 7 päivän jakso, jolloin lämpötilan keskiarvo on alittanut -30 °C. Lisäksi on ollut toinen 7 päivän jakso, jolloin lämpötilan keskiarvo on alittanut -20 °C. Muissa 7 päivän jaksoissa pakkasen on ollut alle -20° C.

Taulukon 3 perusteella simulointien mitoittavana kuukautena käytetään vuoden 1987 tammikuuta. Mitoittavan pakkasjakson pituudeksi valitaan 7 päivää, ja lämpötilaksi -31 °C (pyöristetään -30 °C). Lisäksi ennen mitoittavaa pakkassimulointia tunneliverkostoa simuloidaan pidemmältä ajanjaksolta käyttäen saatavilla olevaa tuntitason dataa (Helsinki-Vantaa ASHRAE IWEC 2), jotta saadaan selville esimerkiksi tunnelin ympäristössä olevan maaperän lämpötekniinen käyttäytyminen.

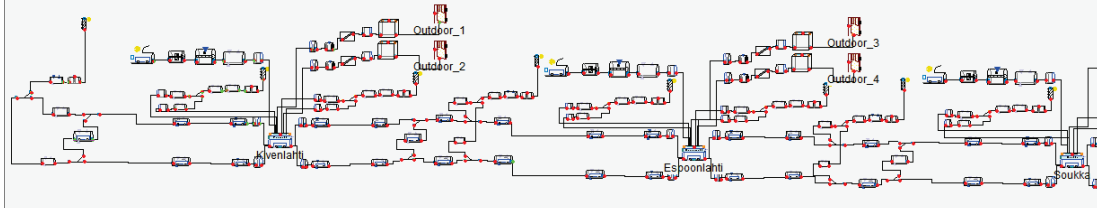
Mitoittavan simuloinnin (-30°C / 7vrk) tärkeimpänä tarkoituksena on vastata kysymykseen: ”kuinka kova pakkasen tunneliin voi pahimmillaan muodostua?”. Toisaalta voisi olla mielekästä tutkia tilanne, jossa pakkasjakson pituus on koko kuukausi ja lämpötila kyseisen kuukauden keskilämpötila, eli tässä tapauksessa -16,5 °C. Ennen tässä työssä tehtäviä simulointeja Länsimetro vaihe 2:n tunneliverkostolle on kuitenkin tehty herkkyystarkasteluja, jossa kävi ilmi, että -30°C / 7vrk –tilanne laskee tunnelin lämpötiloja huomattavasti enemmän kuin -16,5°C / 30 vrk –tilanne. Tuloksen voi perustella sillä, että -30°C / 7vrk –simuloinnissa on aluksi tunnelin ja ulkoilman välillä huomattavan suuri lämpötilaero, joka johtaa simuloinnin alussa lähes puolet suurempaan lämpötehon siirtymiseen verrattuna -16,5°C / 30 vrk –simulointiin (työn laajuuden rajauksen vuoksi -16,5°C / 30 vrk simulointituloksia ei esitellä tässä työssä).

Näin ollen -30°C / 7vrk –mitoitustilanteen todettiin olevan hyvä indikaattori selvittämään tunneliverkoston lämpötekniistä käyttäytymistä lyhytkestoisten erittäin kovien pakkasjaksojen aikana. Näin kovan pakkasjakson todennäköisyys Helsingin alueella on erittäin pieni,

mutta koska simulointien tarkoituksena on tutkia ääritilannetta, on em. lukujen käyttö perusteltua.

4.4 Simuloinnin lähtötiedot

Tässä osassa käydään läpi ne Länsimetro vaihe 2:n tekniset lähtötiedot, jotka ovat oleellisia tunnelin olosuhdesimulointien kannalta. Alla esitettävien lähtötietojen perusteella on Länsimetro vaihe 2:sta rakennettu olosuhdemalli, jonka avulla työn simuloinnit on suoritettu. Kuvassa 10 esitetään kuvakaappaus Länsimetro vaihe 2:n olosuhdemallista, joka on tehty IDA Tunnel –ohjelmalla.

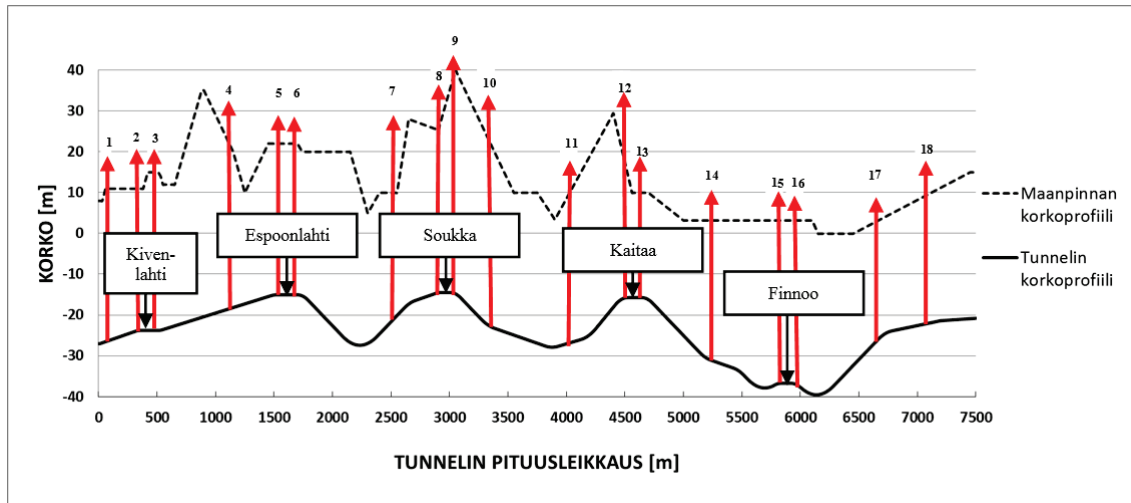


Kuva 10. Simulointimallin topologinen rakenne. Kuvassa on esitetty Kivenlahden, Espoonlahden sekä Soukan asemat.

4.4.1 Tunneli

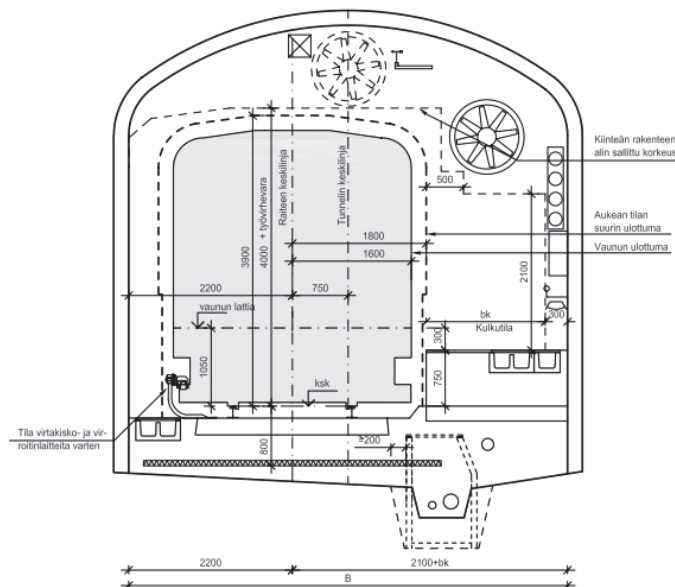
Länsimetro vaihe 2 kulkee kokonaisuudessaan maan alla ja sen tunneliosuuden pituus on yhteensä 7 kilometriä. Lännessä tunneli päättyy Kivenlahden aseman jälkeen maan alle, ja idässä se yhdistyy Finnoon aseman jälkeen Länsimetro vaihe 1:n tunneliin.

Länsimetro vaihe 2:n tunneliosuuden varrella on yhteensä 5 metroasemaa ja 18 paineentasauskuilua. Kuvassa 11 esitetään tunnelin pituusleikkaus, josta voidaan nähdä tunnelin ja maanpinnan korkeusprofiili sekä metroasemien ja paineentasauskuilujen sijainnit. Paineentasauskuiluja kuvataan punaisilla nuolilla. Lisäksi kuilut on numeroitu lännestä itään nousevassa järjestyksessä.



Kuva 11. Länsimetro vaihe 2:n tunnelin pituusleikkaus lännestä itään.

Länsimetrossa metrojunien kulkusuunnat on erotettu omiin tunneleihinsa, joten tunneleita kulkee kaksi rinnakkain. Molempien tunnelien poikkileikkaus on simuloinneissa 25m^2 . Rinnakkaiset tunnelit on yhdistetty toisiinsa noin 150 metrin välein olevilla yhdystunneleilla, jotka toimivat huolto- ja pelastusyhteyksinä. Simuloinneissa on oletettu, että yhdystunnelit ovat normaalikäytössä suljettuna, joten ilma ei pääse niiden kautta vaihtumaan tunnelista toiseen. Lisäksi ratalinjalla on yhteensä 5 raiteenvaihtopaikkaa, joiden kautta tunnelien ilmatilat sen sijaan ovat yhteydessä toisiinsa. Tunnelin tyypipoikkileikkaus esitetään kuvassa 12. (Rossi, et al., 2012.)



Kuva 12. Tunnelin tyypipoikkileikkaus (HKL, 2008).

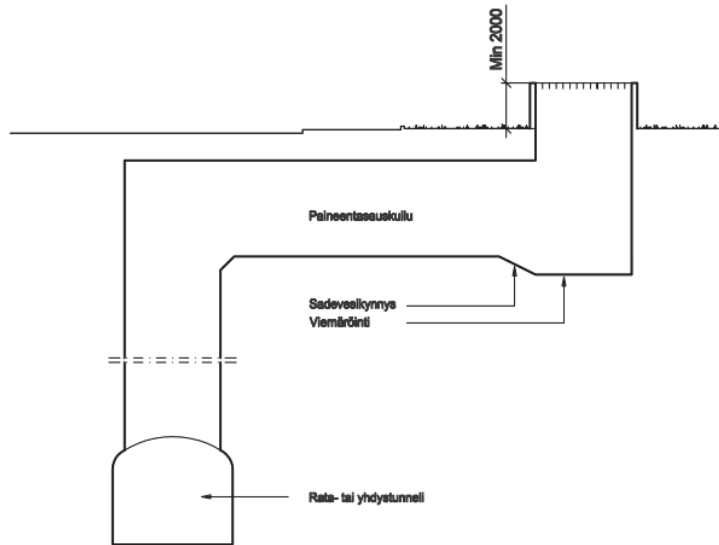
Jotta simulointimalli toimii oikein, on tunnelille mallinnettava suuaukko. Suuaukon mallintamiseen liittyen simulointimalli kattaa Länsimetro vaihe 2:n lisäksi 4 kilometriä tunnelia Länsimetro vaihe 1:n puolelta, sekä kolme Länsimetro vaihe 1:n metroasemaa (Matinkylä, Niittykumpu, Urheilupuisto). Simulointimallissa tunnelille on mallinnettu kuvitteellinen suuaukko Urheilupuiston aseman jälkeen (näin tehtäessä ei tarvitse mallintaa kaikkia maanalaisia asemia ennen todellista tunnelin suuaukkoa, joka sijaitsee Helsingin metron puolella vasta Sörnäisten aseman jälkeen). Jotta kuvitteellisen suuaukon vaikutus voidaan mitätöidä Länsimetro vaihe 2:n tunneliosuudelle, on Länsimetro vaihe 1:stä mallinnettu 3 asemaa tähän väliin. Näin mallinnettuna suuaukko ei vaikuta simulointien tuloksiin välillä Kivenlahti-Finnoo.

Länsimetron tunneliosuutta ei lämmitetä. Näin ollen ainoina lämmönlähteinä tunnelissa ovat maaperään varautunut lämpö sekä junista, laitteista ja ihmisistä aiheutuvat lämpökuormat. Lisäksi asemilta virtaa jonkin verran lämmitettyä tuloilmaa tunneleihin, mutta lämmittävä vaikutus tunneleihin on vähäinen.

Länsimetron tunneleiden ilmanvaihto tapahtuu painovoimaisesti sekä metrojunien mäntävaikutuksesta. Tunnelissa olevia puhaltimia käytetään pääasiassa vain savunpoistoon, joten simuloinneissa puhaltimien on oletettu olevan pois päältä. Tulo- ja poistoilmareitteinä toimivat paineentasauskuilut sekä metroasemien liukuporraskuilut.

4.4.2 Paineentasauskuilut

Länsimetro vaihe 2:ssa kuiluja on suunnitteilla yhteensä 18 kpl. Niistä 10 kuilua sijaitsee asemilla siten, että jokaisen aseman molempiin päihin rakennetaan paineentasauskuilu. Loput 8 kuilua sijaitsevat ratatunneliosuudella keskimäärin 500-600 metrin välein. Paineentasauskuiluista on yhteys molempiin ratatunneleihin. Simuloinneissa kaikkien kuilujen poikkipinta-alana on käytetty 20m². Aiemmin kuvassa 11 esitettiin kuilujen sijoittelu tunneliosuudella. Kuilut on numeroitu lännestä itään nousevassa järjestyksessä. Kuvassa 13 puolestaan esitetään paineentasauskuilun periaatepiirustus. (Rossi, et al., 2012.)



Kuva 13. Paineentasauskuilun periaatepiirustus (HKL, 2008).

Simuloinneissa paineentasauskuilujen yläpäähän maanpinnan yläpuolelle on mallinnettu säädettävät säleiköt, joilla kuilujen ilmavirtoja voidaan kuristaa. Varsinainen säädettävä osa koostuu sulkupellistä, jonka lisäksi käytetään vakioasennossa olevaa ulkosäleikköä. Selkeyden vuoksi sulkupellistä ja ulkosäleiköstä käytetään tässä työssä yhteisnimitystä ”säädettävä säleikkö”.

Simuloinneissa säleikköjen säätö tapahtuu pinta-alaperusteisesti. Säleikköjen ollessa täysin auki, on virtausaukon ala sama kuin kuilun poikkileikkaus 20m². Mitoituspakkassimuloinneissa säleikköjen perusasentona käytetään kokemuseräistä 70%:n kuristusta (=säleiköt 30% auki), jolloin säleikköjen virtausaukon ala on 6m². Talvi-aikana säleiköt eivät siis koskaan ole täysin auki.

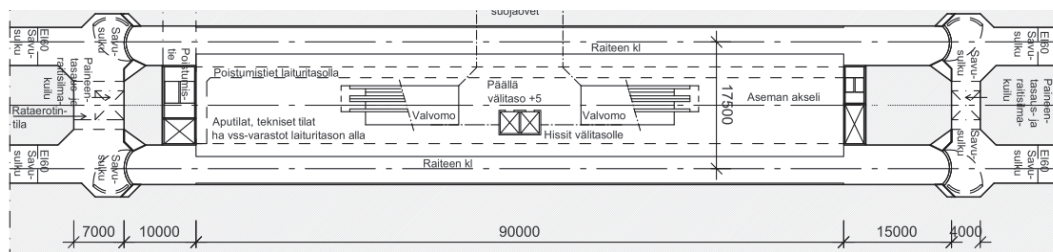
Simuloinneissa säleikköjä säädetään seuraavasti:

1. Metrojunien kulkuaikana klo 05:00-24:00 kaikki säleiköt ovat auki. Säleikköjen aukioloprosentteina käytetään joko 30%, 10%, 5% tai 1%. Yöllä klo 00:00-05:00, kun junat eivät kulje, kaikki säleiköt ovat kiinni. Säleiköt ovat kiinni, kun niiden aukioloprosentti on 1% (simuloinneissa oletetaan, että säleiköt eivät ole kiinni ollessaan täysin tiiviitä).

- Simulointimallissa sulkupellille ei ole mahdollista antaa virtausaukon pinta-alasta riippuvaa, muuttuvaa painehäviökerrointa, vaan painehäviökerroin on vakio kaikilla aukioloprosenteilla. Kaikille sulkupelleille käytetään IDA Tunnel -ohjelman oletuspainehäviökerrointa 0,1 (sama kerroin molemmille virtaussuunnille). Myös kaikille ulkosäleiköille käytetään ohjelman oletuspainehäviökertoimia (0,5 virtaus sisään ja 1,0 virtaus ulos).

Tuulen vaikutusta ei ole otettu simuloinneissa huomioon, joten näin ollen myöskään säleikköjen suuntauksella ei ole simuloinneissa merkitystä. Todellisuudessa tuuli pääsee puhaltamaan kuilujen säleikoista sisään, ja näin talvella jäähdyttämään tunnelia entisestään.

Simulointeja varten mallinnetaan ratatunneliosuuden ja kuilujen lisäksi kaikki Länsimetro vaihe 2:n viisi asemaa (Kivenlahti, Espoonlahti, Soukka, Kaitaa ja Finnoo). Lisäksi Länsimetro vaihe 2:ssa rakennetaan maanalainen metrovarikko Sammalvuoreen, mutta yksinkertaistuksen vuoksi se jätetään pois olosuhdesimuloinneista. Asemien korkoasemat on aiemmin esitetty kuvassa 11. Aseman laituritason tyyppipohjakuva nähdään puolestaan kuvasta 14.



29

Olosuhdesimulointien näkökulmasta oleellisin osa asemasta on asemalaituri, koska se on välittömästi yhteydessä itse metrotunneliin. Asemien laituripituus on 90 m. Simulointimalissa laituritason ja metrotunnelin ilmatilat ovat vapaasti yhteydessä toisiinsa. Laituritason lämmitys on oletettu hoidettavan pelkästään lämmitettävällä tuloilmalla. Simuloinneissa kaikille asemille tuodaan jatkuvasti $7\text{ m}^3/\text{s}$ tuloilmaa, jonka sisäänpuhalluslämpötila on $+20^\circ\text{C}$.

Kaikille asemille mallinnetaan lisäksi liukuporraskuilut asemasuunnitelmien mukaisesti. Yläpäästään liukuportaat ovat yhteydessä asemahalliin, josta puolestaan on yhteys ulkoilmaan. Asemahallin ulko-ovet ovat virtausteknisesti aseman ”kapein” kohta, joten simuloinneissa tarkkaillaan erityisesti ilman virtausnopeuksia ulko-ovien kohdalla.

Kaikille asemille mallinnetaan vuorokautinen käyttäjämääräprofiili, joka ottaa huomioon asemalaiturilla oleskelevien ihmisten lukumäärän vuorokautisen vaihtelun, sekä aseman oviaukkojen keskimääräisen aukiolopinta-alan vaihtelun.

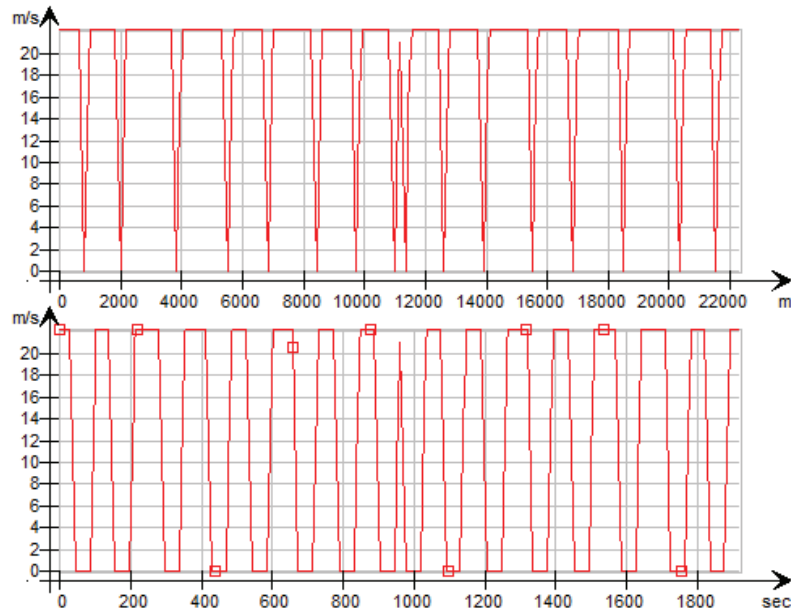
4.4.4 Junaliikenne

Simuloinneissa metrojunan tyyppinä käytetään uutta M300-sarjaa. Olosuhdesimulointien kannalta junan tärkeimmät tekniset tiedot ovat junan ulkoiset mitat sekä suunniteltu mitoitussnopeus. M300-sarjan junassa on 4 vaunua, ja sen yhteispituus on 88 metriä. Junan leveys on 3,2 metriä ja korkeus 3,7 metriä. Junan suunniteltu mitoitussnopeus on 80 km/h. (HKL, 2015.)

Nykyisin Helsingin metro kulkee ruuhka-aikoina 4 minuutin vuoroväleillä, ja muutoin 5 minuutin vuoroväleillä (Reittiopas, 2016). Yöllä klo 00:00-05:00 välillä junat eivät kulje. Länsimetron liikenteen alkaessa ruuhkaliikenteen vuorovälinä tulee olemaan 2,5 minuuttia. Mahdollinen metron automatisointi mahdollistaa junien ajamisen jopa 90 sekunnin vuorovälillä. (Länsimetro Oy, 2016.)

Simuloinneissa käytetään junien vuorovälinä 2,5 minuuttia. Yksinkertaistuksen vuoksi vuoroväli pidetään koko ajan vakiona. Myöskään simuloinneissa junat eivät kulje öisin klo 00:00-05:00 välillä.

Kuva 15 esittää yhden junan nopeutta tunnelissa sekä matkan, että ajan funktiona. Juna saapuu tunneliin mitoitussnopeudella 80 km/h. Ensimmäistä asemaa lähestyessään juna alkaa hidastaa $1,3\text{ m/s}^2$ hidastuvuudella, kunnes se pysähtyy aseman kohdalla. Pysähdyksen jälkeen juna alkaa kiihdyttää $1,3\text{ m/s}^2$ kiihtyvyydellä takaisin mitoitussnopeuteen 80 km/h, jolla se ajaa niin kauan kunnes alkaa taas hidastaa seuraavalle asemalle.



Kuva 15. Junan nopeus tunnelissa matkan ja ajan funktiona.

Junan tunnelissa kulkema kokonaismatka 22000 m muodostuu edestakaisesta matkasta alkaen ja päättyen Urheilupuiston aseman jälkeen olevalle kuvitteelliselle tunnelin suu-aukolle (ks. kohta 4.4.1). Juna saapuu reitin läntiselle pääteasemalle, Kivenlahden asemalle, kohdassa 11000m. Tämän jälkeen juna vaihtaa kääntöraiteella suuntaa ja palaa takaisin. Yksi juna ajaa koko edestakaisen matkan tunnelissa n. 32 minuutissa. Näin ollen 2,5 minuutin vuoroväleillä simulointimallin tunneliverkostossa voi olla ajossa samanaikaisesti 12 junaa.

5 Metrotunnelin olosuhdeanalyysi

Tässä kappaleessa selvitetään ja analysoidaan simulointien avulla Länsimetro vaihe 2:n tunneliverkoston termodynaaminen ja aerodynaaminen käyttäytyminen, kun poikkeuksellisen kova -30°C pakkasen kestää yhtäjaksoisesti 7 vrk peräkkäin. Tunnelin ympäristössä olevan maaperän lämpötilaprofiili ei kuitenkaan ehdi lähes lainkaan reagoimaan 7 päivän mittaisiin pakkaspiikkeihin, joten aluksi täytyy simuloida tunnelin keskimääräinen lämpötekninen käyttäytyminen pidemmältä ajanjaksolta, jotta maaperän todenmukainen lämpötilaprofiili saadaan selvitettyä.

Aluksi tunneliverkostoa simuloidaan 30 vuoden ajalta ”longterm” -menetelmällä (ks. kohta 2.2). Longterm-simuloinnissa käytetään säädätana Helsingin säätä (Helsinki-Vantaa ASH-RAE IWEK 2). Tämän jälkeen samalla säädätalla tutkitaan tunneliverkoston lämpötiloja kolmen peräkkäisen talvikuukauden ajalta ”winter season” -menetelmällä (ks. kohta 2.2). Kun saadaan selville tunneliverkoston keskimääräinen lämpötilaprofiili talvikaudella, tehdään viimeiseksi simulointeja mitoittavalla -30°C pakkasjaksolla.

Metrotunnelin olosuhdeanalyysissä kaikkien paineentasauskuilujen säleiköt ovat jatkuvasti perusasennossaan, eli päivällä 30% auki ja yöllä kiinni. Myöhemmin kappaleessa 6 säleikköjen kuristusta vaihdellaan, kun etsitään säleikköjen optimaalista kuristusaluetta.

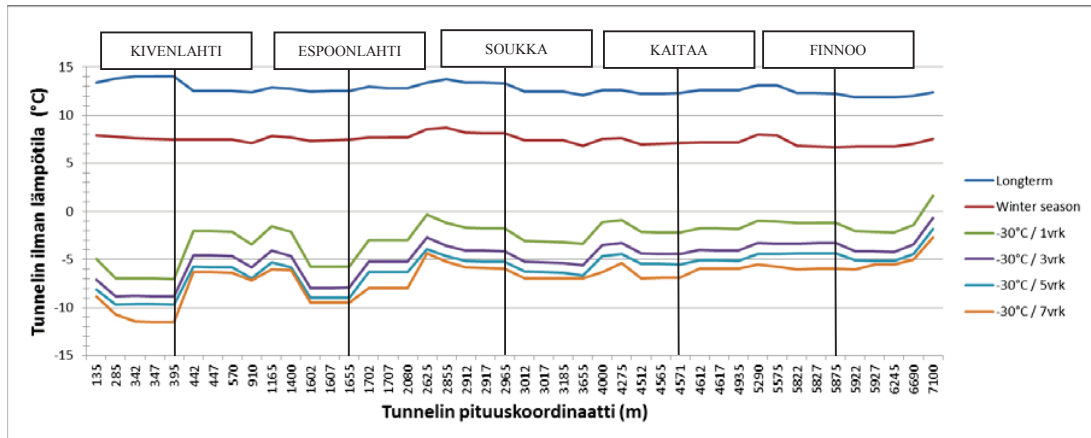
5.1 Termodynaaminen analyysi

Olosuhdeanalyysin termodynaamisessa osassa tutkitaan mitoituspakkasen vaikutusta tunnelin lämpötilaprofiiliin koko tunnelin pituusleikkauksen (7 km) matkalta. Tämän jälkeen tutkitaan mitoituspakkasen vaikutusta lämpötiloihin tunnelissa paikallisesti, jolloin kuvajissa pystytään paremmin havainnollistamaan lämpötilan putoamisen dynamiikkaa. Lisäksi havainnollistetaan junaliikenteen sekä tunnelin korkoprofiilin vaikutusta lämpötiloihin.

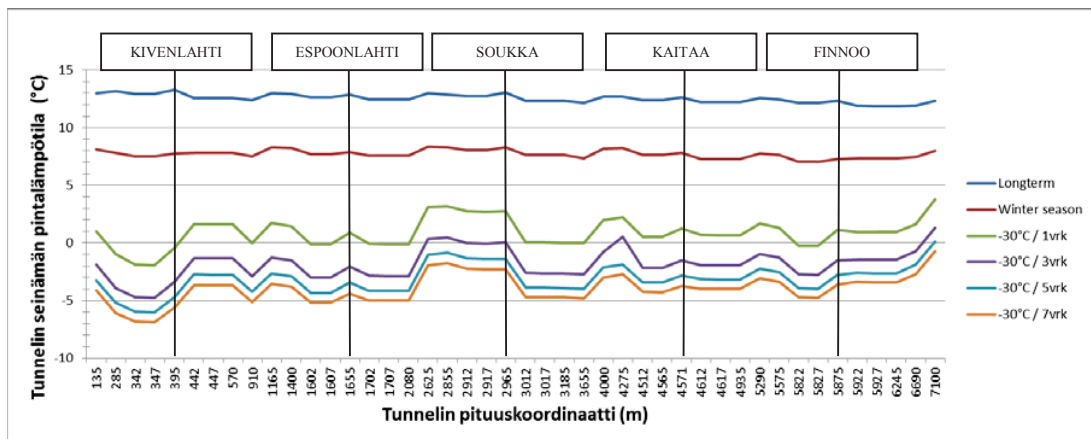
5.1.1 Mitoituspakkasen vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin

Kun ulkoilman lämpötila putoaa äkillisesti, alkaa lämpötila metrotunneliverkostossa pudota myös melko nopeasti. Tunnelin lämpötilojen nopea reagoiminen ulkoilman lämpötilamuutoksiin johtuu tunneliverkoston kuilurakenteista, joiden kautta tunnelista on yhteys ulkoilmaan. Lämpötilaerot ulkoilman ja tunnelin välillä pyrkivät tasaantumaan kuilurakenteiden kautta kulkevien ilmavirtausten avulla (ilmavirtaukset käsitellään tarkemmin kohdassa 5.2).

Kuvassa 16 esitetään tunnelin ilman lämpötilan muutos tunnelin pituusleikkauksessa, ja kuvassa 17 tunnelin seinämän pintalämpötilan muutos tunnelin pituusleikkauksessa, kun -30°C mitoituspakkasen kestää yhtäjaksoisesti 7 vuorokautta peräkkäin. Samoissa kuvissa esitetään myös tunnelin erittäin pitkän aikavälin (30 vuotta) keskimääräinen stabiloitunut lämpötilaprofiili (”longterm”), sekä tunnelin keskimääräinen stabiloitunut lämpötilaprofiili kolmen peräkkäisen talvikuukauden jälkeen (”winter season”). Mitoituspakkassimuloinnin (-30°C) alkuarvoina käytetään tunnelin ”winter season”-lämpötilaprofiilia.



Kuva 16. Tunnelin ilman lämpötilan putoaminen.



Kuva 17. Tunnelin seinämän pintalämpötilan putoaminen.

Kuvista 16 ja 17 havaitaan, että tunnelin ilman lämpötila sekä tunnelin seinämän pintalämpötila ovat longterm-simuloinnissa reilusti yli $+10^{\circ}\text{C}$ joka puolella tunnelia. Tämä on siis tunnelin keskimääräinen stabiloitunut lämpötila 30 vuoden simuloinnin jälkeen. Kun tarkennetaan lämpötilaprofiilia kolmen peräkkäisen talvikuukauden (Joulukuu-Helmikuu) vaikutuksella, voidaan tunnelin keskimääräinen stabiloitunut lämpötilaprofiili lukea nyt winter season –käyrältä. Havaitaan, että keskimäärin talvella Länsimetron tunnelissa lämpötila pysyy välillä $+10^{\circ}\text{C} - +5^{\circ}\text{C}$.

Kun ulkolämpötila putoaa äkillisesti -30°C :een, alkaa myös lämpötila tunnelissa pudota nopeasti. Kun -30°C ulkolämpötila on kestänyt yhtäjaksoisesti yhden vuorokauden ajan, on tunnelin lämpötilaprofiili pudonnut $-30^{\circ}\text{C} / 1\text{vrk}$ –käyrälle (huomaa, että -30°C -simuloinnin alkuarvoina on käytetty tunnelin ”winter season”-lämpötilaprofiilia). Havaitaan, että jo yhden vuorokauden jälkeen tunnelin ilman lämpötila on kauttaaltaan alle $+0^{\circ}\text{C}$. Myös hieman hitaammin reagoiva tunnelin seinämän pintalämpötilakin on pudonnut jo yhden vuorokauden jälkeen useassa kohtaa $+0^{\circ}\text{C}$:n tuntumaan. Tässä työssä tutkitaan tarkoituksellisesti tunnelin ilman lämpötilaa sekä tunnelin seinämän pintalämpötilaa, koska tunnelissa erillisessä asennuskourussa kulkevan palovesiputken lämpötilan voidaan olettaa pysyvän kyseisten lämpötilakäyrien välissä. Näin ollen tämän työn tulosten kannalta ei ole tarpeellista tutkia lämpötilaprofiilia esimerkiksi tunnelin seinämän sisästä.

Kuvista 16 ja 17 nähdään lisäksi tunnelin lämpötilaprofiilit, kun -30°C mitoituspakkanen on kestänyt yhtäjaksoisesti 3, 5 ja 7 vrk. Lopullinen tunnelin pakkassuojauksen mitoittava lämpötilaprofiili voidaan lukea -30°C / 7vrk –käyrältä. Havaitaan, että kun -30°C mitoituspakkanen kestää yhtäjaksoisesti 7 vrk peräkkäin, on tunnelin ilman lämpötila pudonnut välille -3°C – -12°C . Tunnelin seinämän pintalämpötila on puolestaan pudonnut välille -1°C – -7°C .

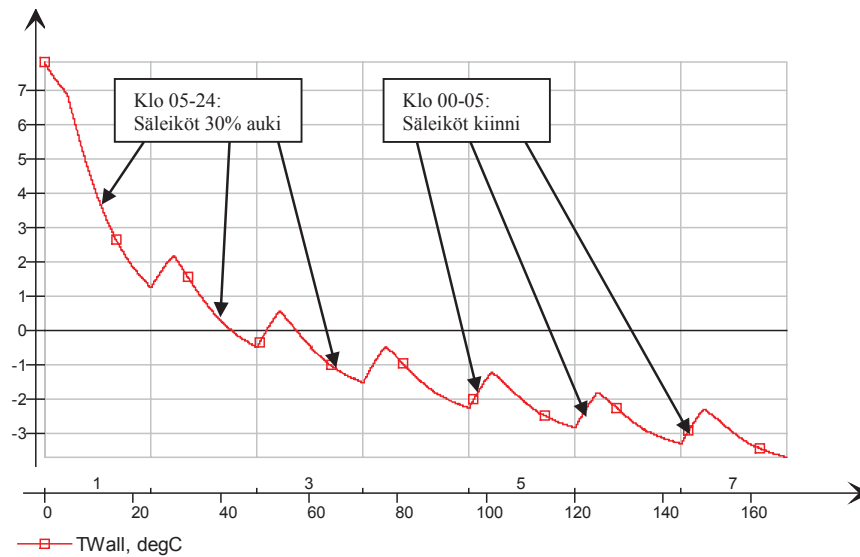
Kun simulointituloksia verrataan ohjeistuksissa määriteltuihin olosuhdetavoitteisiin, voidaan havaita, että -30°C –mitoituspakkasen aikana lämpötilatavoitteisiin on hankala päästä niin tunnelissa kuin asemillakin. RATO:n ohjeiden mukaan tunneleiden jäätyminen tulee estää. Kuitenkin mitoituspakkassimulointi (-30°C / 7vrk) osoitti, että viikon mittainen yhtäjaksoinen kova pakkanen saa tunnelin lämpötilaprofiilin kauttaaltaan pakkasen puolelle. Näin ollen riski palovesiputken jäätymiselle tai jään kertymiselle ratalaitteisiin on suuri ilman asianmukaista pakkassuojausta.

MSK puolestaan ohjeistaa, että asemalaiturin minimilämpötila on talvella oltava $+5^{\circ}\text{C}$, jos laiturin on suoraan yhteydessä tunneliin. Simulointien perusteella edes asemalaiturien lämmittäminen $+20^{\circ}\text{C}$ -tuloilmalla ($7\text{m}^3/\text{s}/\text{asema}$) ei riitä pitämään asemalaitureita tavoitelämpötilassaan $+5^{\circ}\text{C}$. Sen sijaan asemalaituritkin jäähtyvät pinnoistaan -3°C – -5°C välille. Länsimetron omat suunnitteluohjeet määrittelevät, että asemalaiturin lämpöhäviölaskentaan käytetään ratatunnelin mitoituslämpötilana 0°C . Simulointitulosten perusteella ratatunnelin mitoituslämpötila 0°C ei ole riittävä, vaan esimerkiksi -10°C :n käyttö mitoitukseseen voisi tuloksiin nojaten olla perusteltua.

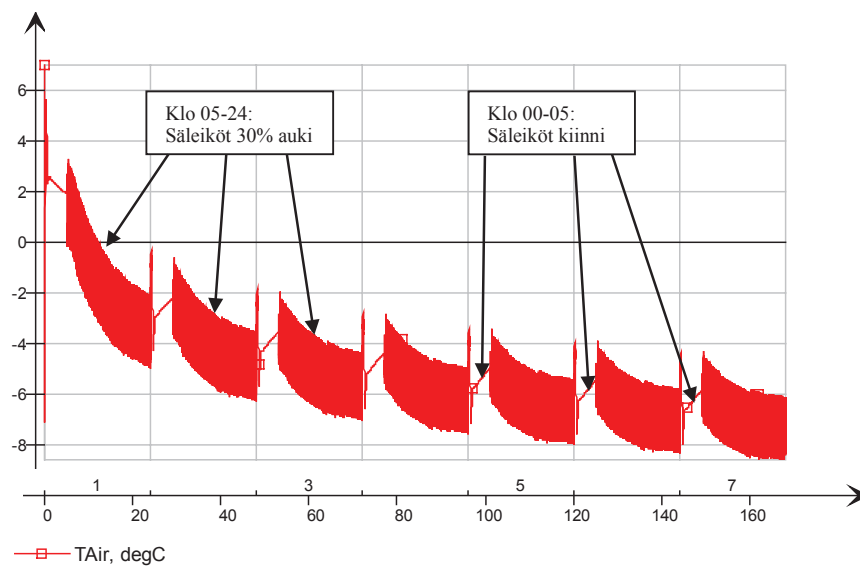
Simulointituloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että kaikkien paineentasauskuilujen säleiköt ovat jatkuvasti perusasennossaan, eli päivällä 30% auki ja yöllä kiinni. Myöhemmin kappaleessa 6 säleikköjen kuristusta vaihdellaan, kun etsitään säleikköjen optimaalista kuristusaluetta. Seuraavissa alakappaleissa käydään puolestaan tarkemmin läpi tunnelin lämpötilan putoamisen dynamiikkaa sekä tunnelin paikallisten lämpötilaerojen syitä.

5.1.2 Mitoituspakkasen vaikutus lämpötiloihin paikallisesti

Tunnelin pituusleikkauksen lämpötilaprofiilista ei pysty havaitsemaan tunnelin lämpötilan putoamisen dynamiikkaa, joten tutkitaan erikseen lämpötilakäyrän käyttäytymistä valitussa tunneliverkoston osassa. Kuvissa 18 ja 19 havainnollistetaan mitoituspakkasen (-30°C / 7vrk) vaikutusta lämpötilan putoamiseen Kaitaan aseman laituritasolla. Kuvista nähdään hyvin kuilujen säleikköjen aukiolo-aikataulun (päivällä 30% auki, yöllä kiinni) vaikutus tunnelin lämpötilojen putoamiseen. Päivisin (klo 05-24), kun säleiköt ovat 30% auki, lämpötila putoaa, ja öisin (klo 00-05), kun säleiköt ovat kiinni, lämpötila hieman nousee. Säleikköjen kiinnioloaika (5h) on kuitenkin suhteessa niin lyhyt verrattuna säleikköjen aukioloaikaan (19h), että kokonaisuudessaan 7 vrk:n aikana lämpötila laskee.



Kuva 18. Tunnelin seinämän pintalämpötilan putoaminen Kaitaan aseman laituritasolla, kun -30°C mitoituspakkanen kestää yhtäjaksoisesti 7 vrk peräkkäin.

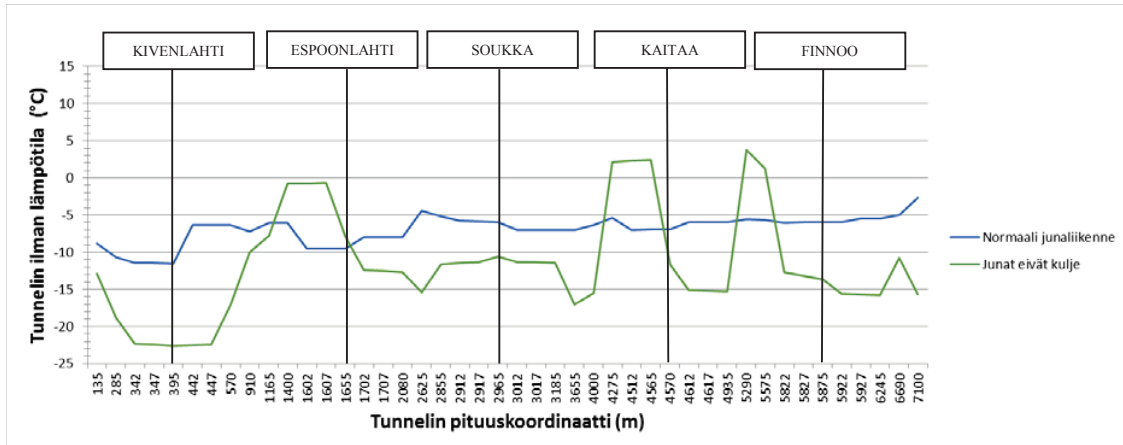


Kuva 19. Tunnelin ilman lämpötilan putoaminen Kaitaan aseman laituritasolla, kun -30°C mitoituspakkanen kestää yhtäjaksoisesti 7 vrk peräkkäin.

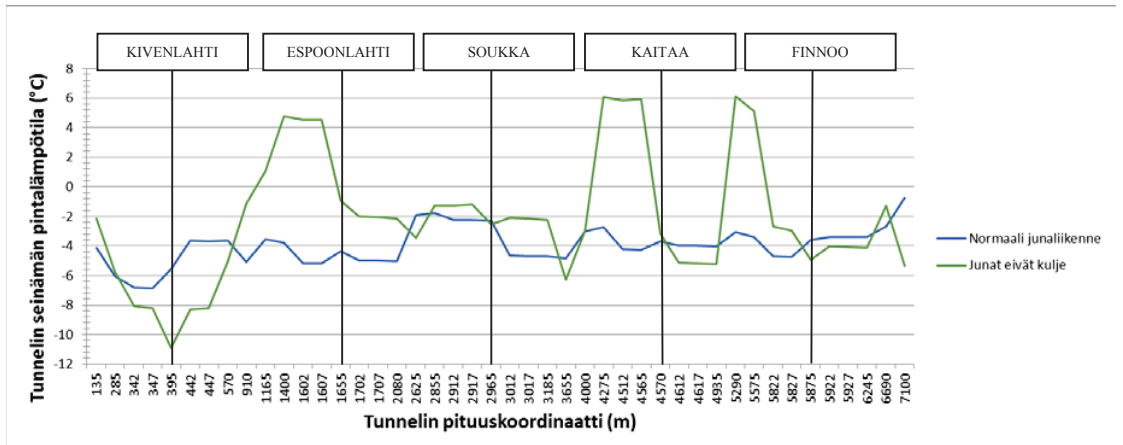
Kuvista 18 ja 19 nähdään myös hyvin, miten 7 vrk:n mitoituspakkaajakson ensimmäisen vuorokauden aikana lämpötila putoaa kaikkein eniten (-30°C -simuloinnin alkuarvoina on käytetty tunnelin ”winter season”-lämpötilaprofiilia), ja että tämän jälkeen lämpötilan putoaminen hieman tasaantuu. Kuvasta 19 havaitaan lisäksi junaliikenteestä aiheutuva asemalaiturin ilman lämpötilan lyhytaikainen vaihtelu, jonka amplitudin suuruus on n. 2°C . Tunnelin seinämän pintalämpötila on puolestaan hitaammin muuttuva suure, joten se ei reagoi vastaavalla tavalla junaliikenteeseen.

5.1.3 Junaliikenteen vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin

Junaliikenne tasaa tunnelin paikallisia lämpötilaeroja, jotka johtuvat tunnelin korkeusvaihteluista sekä asemien ja paineentasauskulujen sijainneista. Tunnelissa mitoitusnopeudellaan (80 km/h) liikkuva juna siirtää tunnelin ilmassa tehokkaasti paikasta toiseen. Kuvissa 20 ja 21 esitetään tunnelin lämpötilaprofiili (-30°C / 7 vrk) normaalisti junaliikenteen aiheuttamana, sekä tilanteessa, jossa junat eivät kulje ollenkaan 7 vuorokauden simulointijakson aikana. Tällöin lämpötilaprofiilissa havaitaan paljon suurempia lämpötilaeroja.



Kuva 20. Junaliikenne tasaa tunnelin ilman lämpötilaeroja tunnelissa (-30°C / 7 vrk).

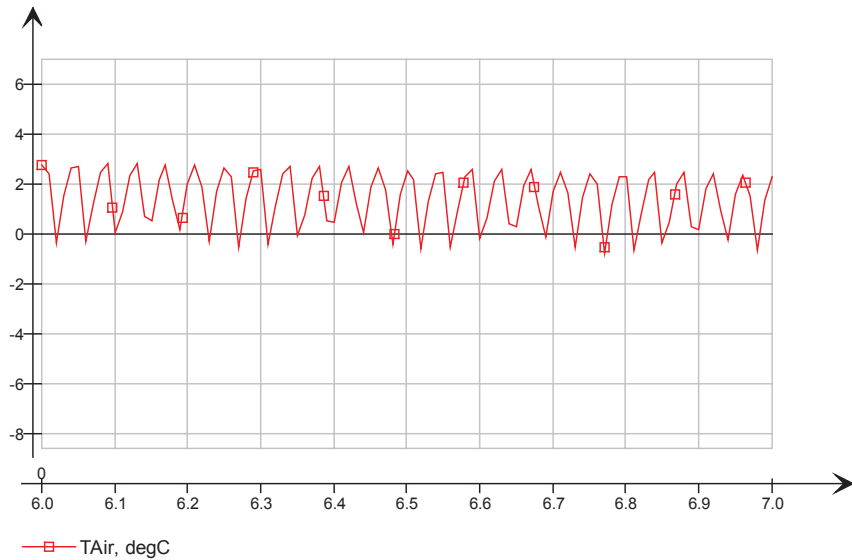


Kuva 21. Junaliikenne tasaa tunnelin seinämän pintalämpötilaeroja tunnelissa (-30°C / 7 vrk).

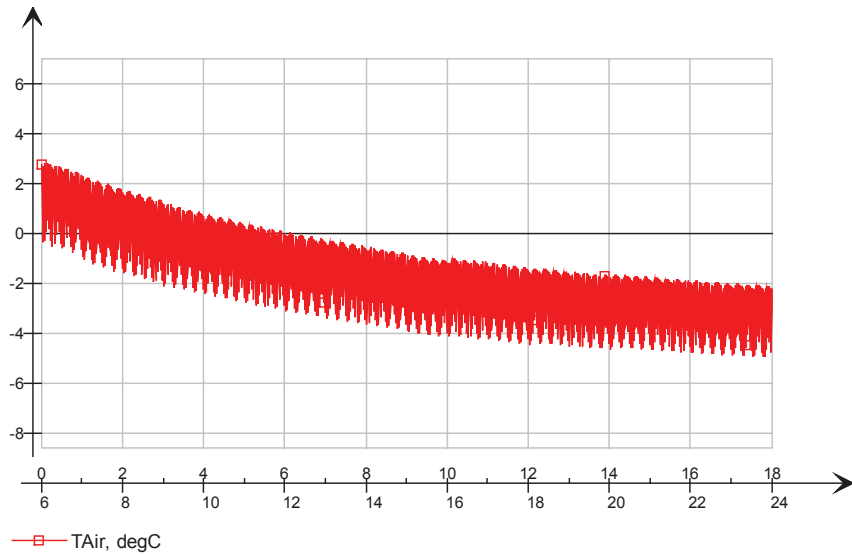
Kuvasta 20 havaitaan, että ilman junaliikennettä tunnelin ilman lämpötila voi vaihdella lämpimimmän ja kylmimmän paikan välillä jopa 26°C , kun junaliikenteen kanssa vaihteluväli on vain $9,5^{\circ}\text{C}$. Kuvasta 21 puolestaan nähdään, että tunnelin seinämän pintalämpötilan suurin vaihteluväli voi ilman junaliikennettä olla 17°C , kun junaliikenteen kanssa ero on vain 6°C . Junaliikenne on siis tehokas tunnelin lämpötilaerojen tasaaja, joka pitää huolen, ettei pakkas kerry liiaksi vain tunnelin tiettyihin osiin. Toisaalta tällöin tunnelin lämpimämmät osat, jotka ilman junaliikennettä pysyisivät jopa plussan puolella, jäähtyvät nekin reilusti nyt pakkasen puolelle.

5.1.4 Junaliikenteen vuoroväleistä aiheutuvat lyhyen aikavälin lämpötilan muutokset

Tunnelin ilman lämpötilan arvo heittelee lähes jatkuvasti johtuen junaliikenteestä. Tunnelin seinämän pintalämpötilan dynamiikka on puolestaan hitaampaa johtuen maaperän lämpöä varaavasta vaikutuksesta, joten se ei vastaavalla tavalla reagoi junaliikenteeseen kuin tunnelin ilman lämpötila. Kuvassa 22 havainnollistetaan, miten ilman lämpötila vaihtelee tunnelissa junaliikenteestä johtuen. Ilman lämpötila vaihtelee samassa syklissä junien vuorovälin (2,5 min) kanssa. Ilman lämpötilan vaihtelun amplitudi on n. 2°C. Lisäksi kuvassa 23 havainnollistetaan samanaikaisesti junaliikenteestä johtuvaa ilman lämpötilan vaihtelua, sekä mitoituspakkasesta johtuvaa ilman lämpötilan putoamista.



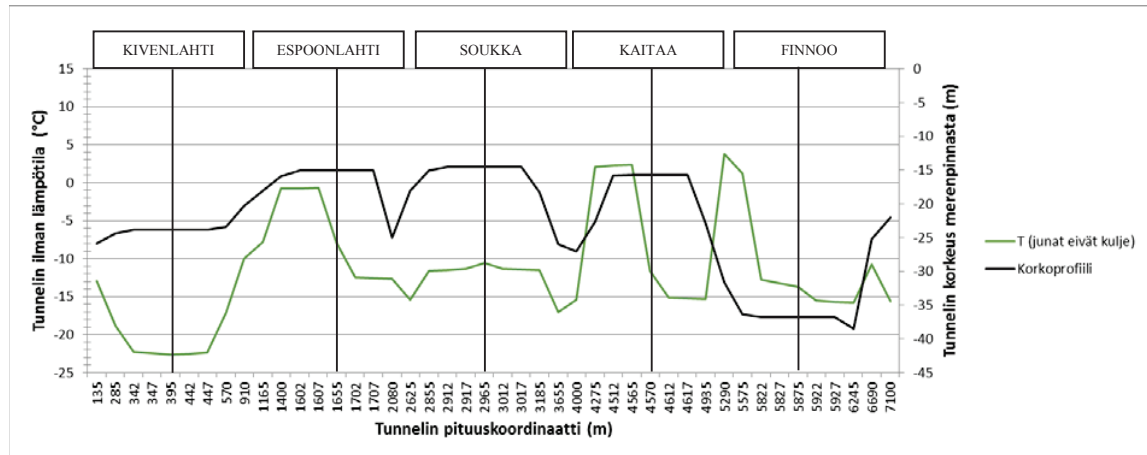
Kuva 22. Junaliikenteestä johtuva ilman lämpötilan vaihtelu Kaitaan asemalla yhden tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 06-07).



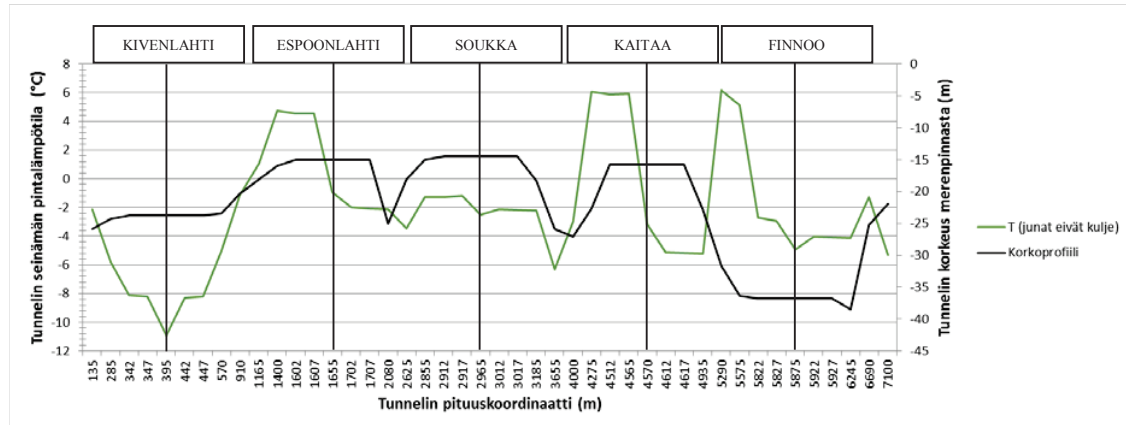
Kuva 23. Junaliikenteestä johtuva ilman lämpötilan vaihtelu sekä mitoituspakkasesta johtuva ilman lämpötilan putoaminen 18 tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 06-24).

5.1.5 Korkoprofiilin vaikutus tunnelin lämpötilaprofiiliin

Niin kuin kohdassa 5.1.3 todettiin, on junaliikenne tehokas lämpötilaerojen tasaaja tunnelissa. Jos junaliikennettä ei kuitenkaan ole, on tunnelin lämpötilan putoaminen seurausta ainoastaan painovoimaisesta ilmvirtauksesta, jolloin tunnelin korkeuserot ja muu geometria aiheuttavat suuria lämpötilaeroja tunneliin. Tätä havainnollistetaan Kuvissa 24 ja 25, joissa tunnelin painovoimaista lämpötilaprofiilin muotoa verrataan tunnelin korkoprofiiliin muotoon. Havaitaan, että keskimäärin lämpötilaprofiili mukailee melko hyvin tunnelin korkoprofiilia. Tämä tarkoittaa, että keskimäärin tunnelin syvemmissä osissa on kylmempää kuin tunnelin korkeammissa osissa. Korkeusprofiilin lisäksi lämpötiloihin vaikuttavat myös muut tunnelin rakenteelliset tekijät, kuten kuilujen sekä raiteenvaihtopaikkojen sijainnit.



Kuva 24. Tunnelin ilman lämpötilan riippuvuus korkoprofiilista (-30°C / 7 vrk).



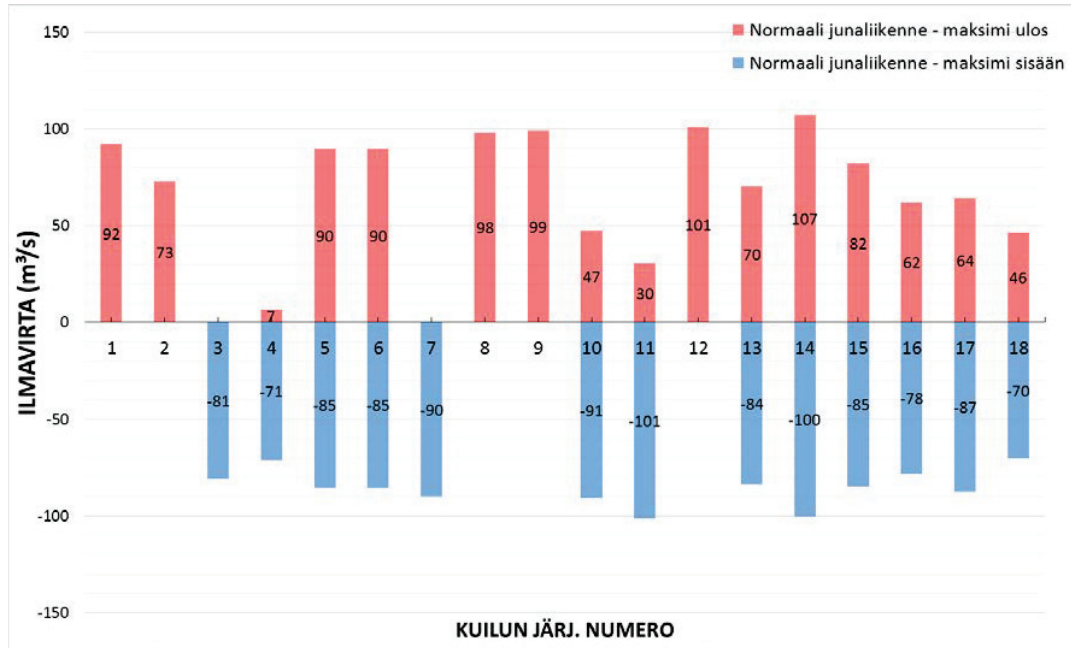
Kuva 25. Tunnelin seinämän pintalämpötilan riippuvuus korkoprofiilista (-30°C / 7 vrk).

5.2 Aerodynaaminen analyysi

Olosuhdeanalyysin aerodynaamisessa osassa tutkitaan kuilujen ilmvirtojen suuruuksia sekä junaliikenteen aiheuttamana, että painovoimaisesti. Lisäksi tutkitaan kuilujen ilmvirtojen riippuvuutta tunnelin korkoprofiilista. Asemilla tutkitaan liukuporraskuilujen ilmvirtauksia sekä ilman virtausnopeuksia oviaukkojen kohdalla. Lopuksi tutkitaan junaliikenteen aiheuttamia paineenvaihteluita tunnelissa.

5.2.1 Kuilujen ilmavirrat

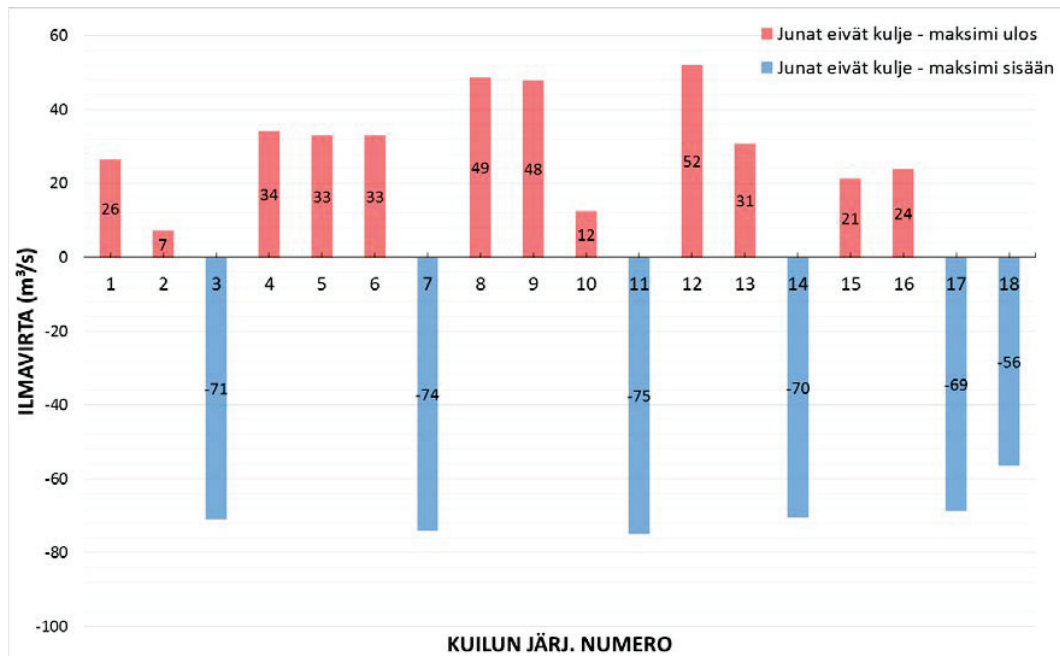
Talvella paineentasauskuilujen kautta kulkevat ilmavirtaukset johtuvat sekä junaliikenteen mäntäefektistä, että kuilujen hormivaikutuksesta, joka pyrkii tasaamaan tunnelin lämpötilaeroja. Kuvassa 26 esitetään Länsimetro vaihe 2:n paineentasauskuiluissa kulkevien ilmavirtojen vaihteluväli (suurin arvo ulos ja suurin arvo sisään) kun junat liikennöivät normaalisti. Ilmavirrat on laskettu mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana. Punaiset palkit kuvaavat suurimpia tunnelista ulospäin kulkevia ilmavirtoja, ja siniset palkit suurimpia kuiluista sisäänpäin tulevia ilmavirtoja. Kuilujen numerointi (1-18) on toteutettu samalla tavalla kuin kappaleen 4.4.1 kuvassa 11.



Kuva 26. Paineentasauskuilujen ilmavirtojen (m³/s) vaihteluväli mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junat liikennöivät normaalisti.

Kuvasta 26 havaitaan, että junaliikenne saa usean kuilun kohdalla ilmavirran kulkemaan sekä sisään, että ulospäin, kun taas osassa kuiluista ilmavirta kulkee ainoastaan yhteen suuntaan. Ilmavirta vaihtaa suuntaa seuraavissa kuiluissa: 4-6, 10, 11 sekä 13-18. Lopuissa kuiluista ilmavirta kulkee ainoastaan yhteen suuntaan. Esimerkiksi kuilussa nro 3 ilmavirta kulkee ainoastaan sisäänpäin, ja ilmavirran suurin arvo on 81 m³/s. Eniten ilmaa vaihtuu kuilun nro 14 kautta, jossa suurin ilmavirta ulospäin on 107 m³/s, ja suurin ilmavirta sisäänpäin 100 m³/s.

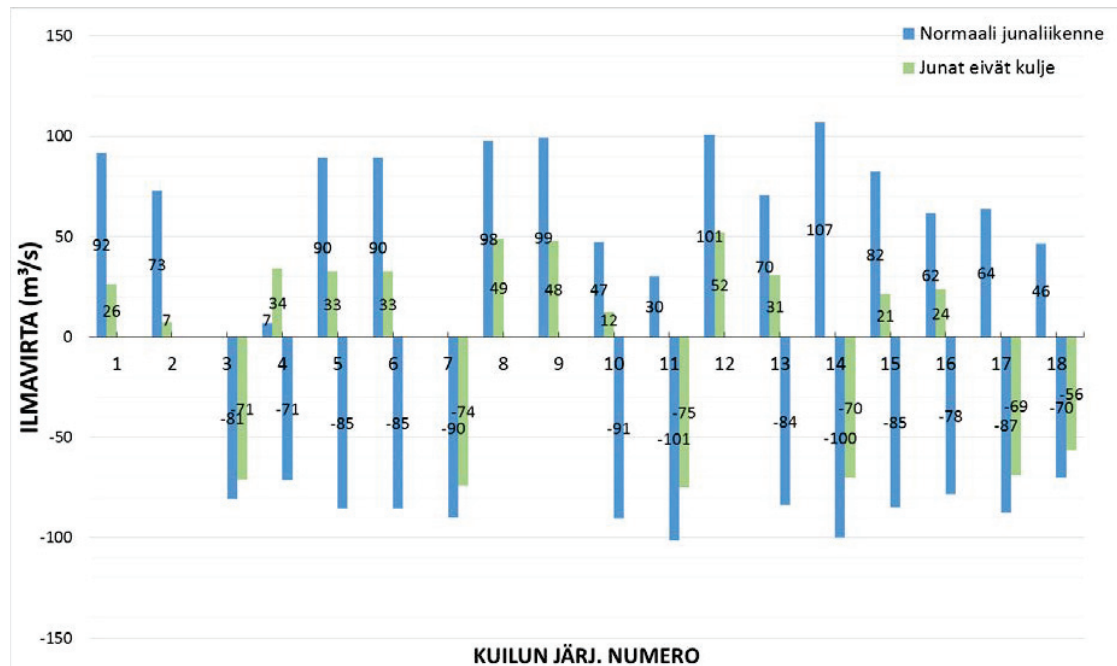
Kuvassa 27 puolestaan esitetään paineentasauskuiluissa kulkevien ilmavirtojen suurimmat arvot (sisään tai ulos) kun junaliikennettä ei ole. Tällöin ilma liikkuu kuiluissa täysin painovoimaisesti, eli kuilujen kautta kulkevat ilmavirrat ovat seurausta ainoastaan kuilun hormivaikutuksesta (yksinkertaistuksen vuoksi tuulen vaikutusta ei ole huomioitu simuloinneissa).



Kuva 27. Paineentasauskuilujen ilmavirtojen (m³/s) suurimmat arvot mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junaliikennettä ei ole.

Kuvasta 27 havaitaan, että painovoimaisessa tilanteessa kaikissa kuiluissa ilmavirta kulkee ainoastaan yhteen suuntaan. Kuiluissa 3, 7, 11, 14, 17 ja 18 ilmavirta kulkee sisäänpäin, ja loppuissa kuiluissa ilmavirta kulkee ulospäin. Suurin ilmavirta sisäänpäin, 75 m³/s, on kuilulla nro 11 ja vastaavasti suurin ilmavirta ulos, 52 m³/s, on kuilulla nro 12.

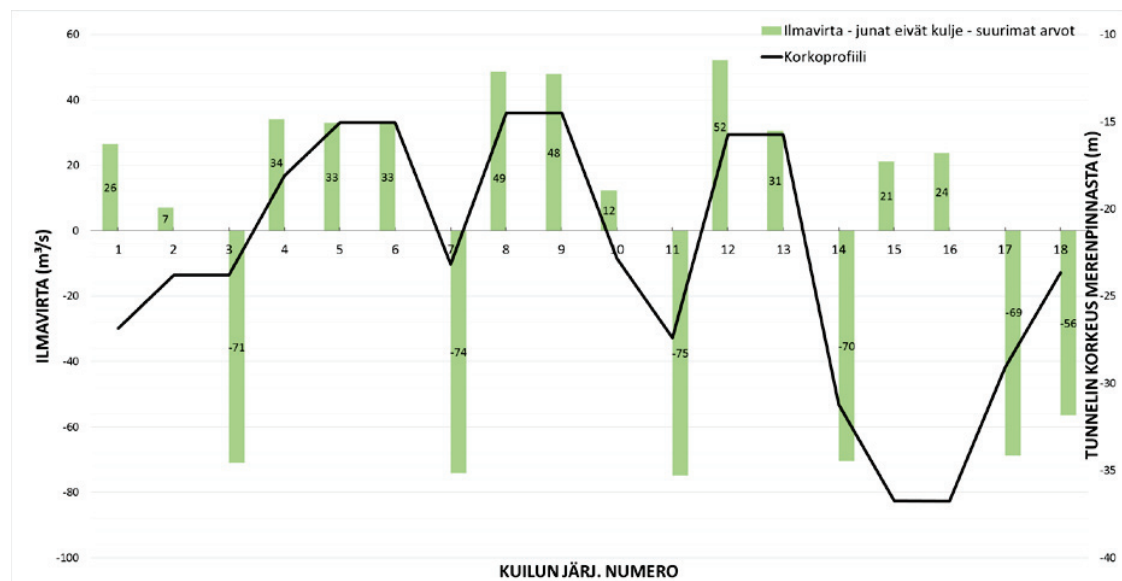
Kuvassa 28 verrataan paineentasauskuilujen ilmavirtoja sekä junaliikenteen aiheuttamana, että painovoimaisesti. Havaitaan, että junaliikenne kasvattaa huomattavasti ilmavirran suuruutta sekä saa ilmavirran vaihtamaan usean kuilun kohdalla myös suuntaa pelkkään painovoimaiseen tilanteeseen verrattuna. Normaalin junaliikenteen ilmavirrat on esitetty sinisillä palkeilla, ja painovoimaiset ilmavirrat vihreillä palkeilla.



Kuva 28. Paineentasauskuilujen ilmavirrat (m³/s) junaliikenteen aiheuttamana sekä painovoimaisesti.

5.2.2 Kuilujen ilmavirtojen riippuvuus tunnelin korkoprofiilista

Aiemmin kappaleessa 5.1.5 havainnollistettiin, miten keskimäärin tunnelin syvemmissä osissa on kylmempää kuin tunnelin korkeammissa osissa. Tunnelin ilmavirtaukset pyrkivät siis keskimäärin sisään (negatiiviset arvot) tunnelin syvemmistä osista, ja ulos (positiiviset arvot) tunnelin korkeammista osista. Tätä havainnollistetaan kuvassa 29, jossa esitetään paineentasauskuilujen painovoimaisten ilmavirtausten riippuvuus tunnelin korkoprofiilista.



Kuva 29. Paineentasauskuilujen painovoimaisten ilmavirtojen riippuvuus tunnelin korkoprofiilista.

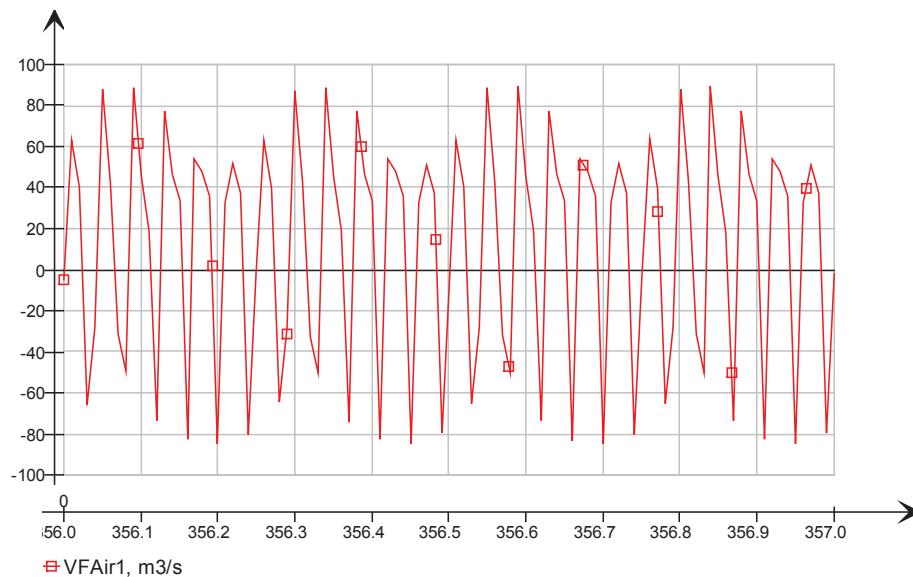
Kuilun ilmavirran suuruuteen vaikuttavat lisäksi kuilun pystypituus sekä kuilun suuruus (mahdolliset vaakasiirtymät) jotka vaihtelevat kuiluittain (mallinnettu Länsimetron suunnitelmien mukaan). Lisäksi asemilla olevien kuilujen ilmavirtoihin vaikuttaa myös asemien lämmitys, mikä havaitaan kuvassa 29 esimerkiksi kuiluista 15 ja 16 (Finnoon aseman kuilut). Vaikka kuilut 15 ja 16 ovat tunnelin syvimmissä osassa, on niiden ilmavirtojen suunta silti ulospäin todennäköisesti asemien lämmittävän vaikutuksen vuoksi.

5.2.3 Junaliikenteen aiheuttamat lyhyen aikavälin ilmavirran muutokset kuiluissa

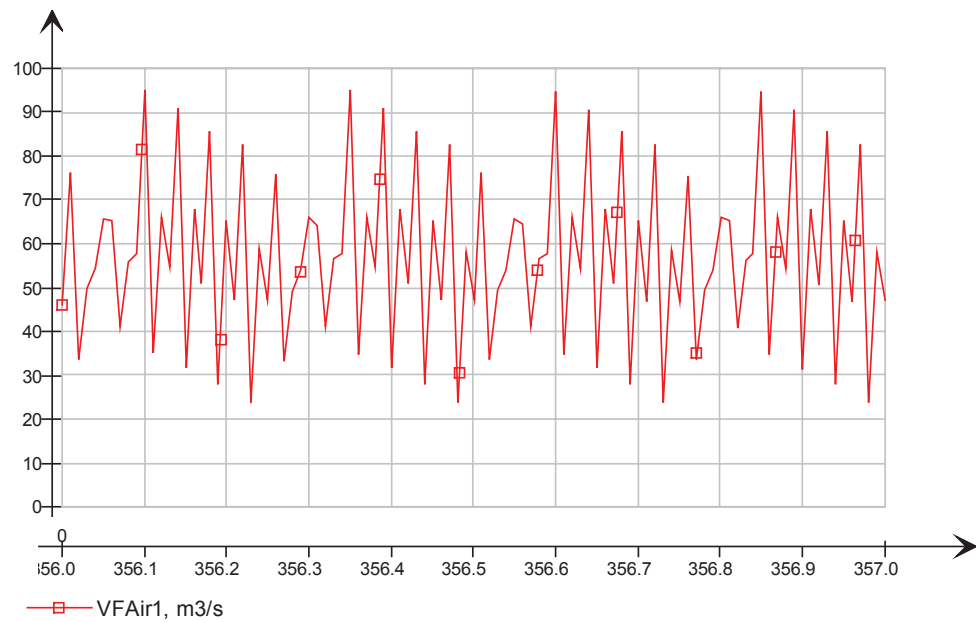
Kuilujen ilmavirtausten lyhyen aikavälin dynamiikkaa voidaan tarkastella kuilukohtaisesti. Kuvissa 30, 31 ja 32 näytetään, miten kuilujen ilmavirtojen suunta ja suuruus vaihtelevat junaliikenteestä johtuen yhden tunnin aikana. Esimerkkeinä käytetään seuraavia kuiluja: 5, 8 ja 11. Kuilujen lyhyen aikavälin ilmavirran vaihtelut ovat seurausta siitä, kun juna ohittaa kuilun 2,5 minuutin välein aiheuttaen säännöllisesti toistuvia työntö- ja imuvirtauksia. Toisin kaikissa kuiluissa ilmavirta ei vaihda suuntaa, mutta tällöinkin ilmavirran suuruus vaihtelee säännöllisesti.

Lisäksi kuilujen 5, 8 ja 11 kohdalla havaitaan ilmavirran amplitudin huojuntaa sekä amplitudin suuruuden vaihtelua. Tämä on seurausta siitä, että kaikki kuilut ovat yhteydessä molempiin ratatunneleihin, joten todellisuudessa kuilujen ilmavirtaukset ovat seurausta kahdesta eri suunnasta tulevan junan yhteisvaikutuksesta. Lisäksi eri kuilujen ilmavirtojen kuvaajat ovat keskenään erilaisia, koska ratatunnelissa vastakkaisista suunnista tulevien junien ”kohtaamispisteet” ovat eri kuiluihin nähden eri kohdissa.

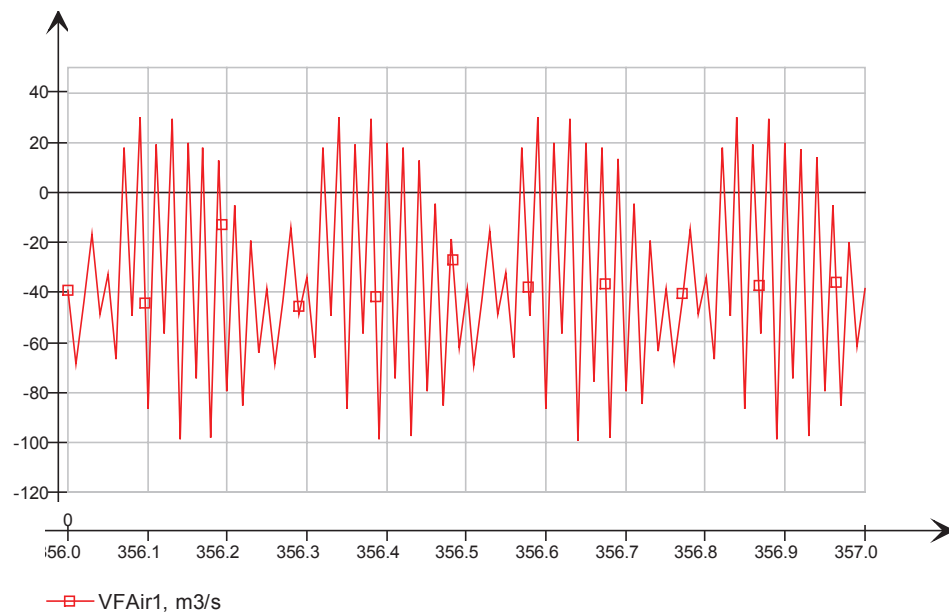
Kuvat 30, 31, ja 32 antavat hyvän käsityksen siitä, miten tehokkaasti junien mäntävaikutus saa ilman liikkumaan tunnelissa. Kuvien perusteella on varsin ymmärrettävää, että kovan pakkasjakson aikana tunnelin lämpötila laskee nopeasti, sillä junien liikkeessa tunneli ”huuhtoutuu” lähes jatkuvasti ulkoilmalla.



Kuva 30. Ilmavirran (m3/s) vaihtelu kuilussa nro 5 yhden tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 7-8).



Kuva 31. Ilmavirran (m3/s) vaihtelu kuilussa nro 8 yhden tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 7-8).



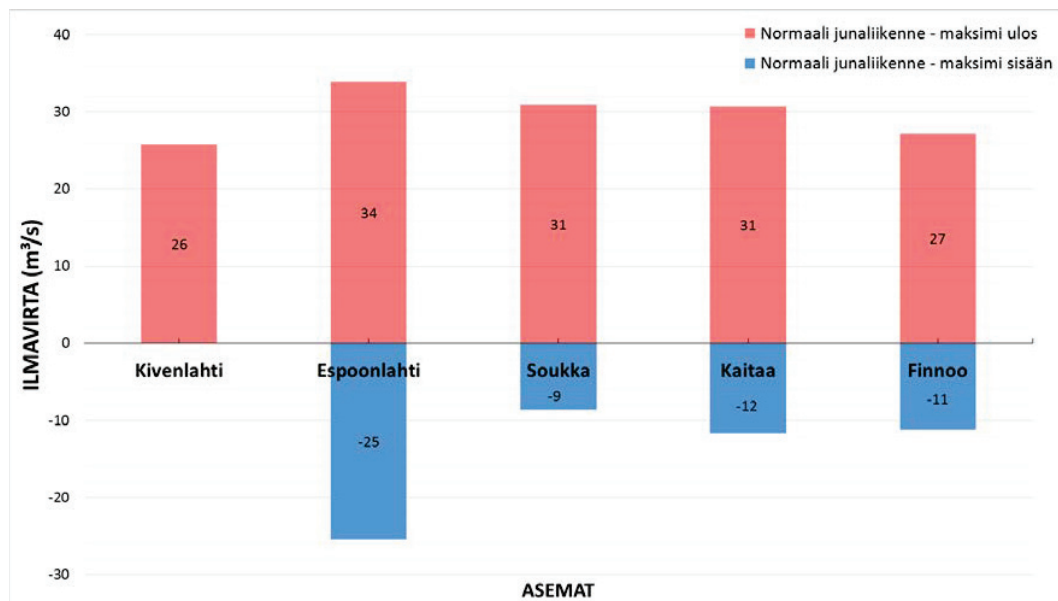
Kuva 32. Ilmavirran (m3/s) vaihtelu kuilussa nro 11 yhden tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 7-8).

5.2.4 Asemien ilmavirrat

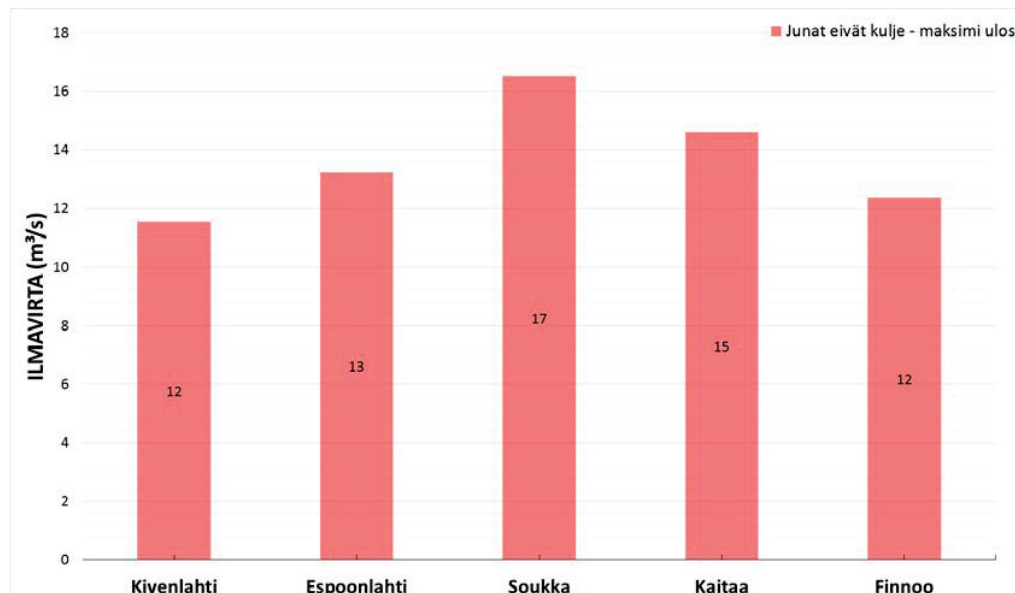
Suurin osa tunnelin ilmavirtauksista kulkee paineentasauskuilujen kautta, mutta osa ilmavirtauksista tapahtuu myös metroasemien liukuporraskuilujen välityksellä. Varsinkin jos metrolaituria ei ole erotettu tunnelista metrolaituriovilla, pääsevät tunnelin ilmavirtaukset vapaasti virtaamaan myös liukuporraskuilujen kautta (Länsimetron simuloinneissa metrolaituriovia ei ole mallinnettu). Asemien liukuporraskuilut ovat yläpäästään yhteydessä asemahalliin, josta puolestaan on ulko-ovien kautta yhteys ulkoilmaan.

Koska liukuportaat toimivat ihmisten kulkureitteinä, tulisi suurten ilmavirtausten siirtyminen tätä kautta estää. Asemien ulko-ovet ovat tyypillisesti aseman ”kapein” kohta, joten mahdolliset häiritsevän suuret ilmavirran nopeudet havaitaan ensimmäisenä ulko-ovien kohdalla. Lisäksi liukuporraskuilujen kautta kulkevat ilmavirtaukset voivat talvella jäähdyttää ilman virtausreittien varrella olevia tiloja, kuten lippuhallia ja muita asiakastiloja, joten liukuporraskuilujen ilmavirtausten hallinta on tärkeä osa tunnelin aerodynaamista suunnittelua.

Kuvissa 33 ja 34 esitetään Länsimetro vaihe 2:n asemien liukuporraskuilujen kautta kulkevien ilmavirtojen suurimmat arvot sekä junaliikenteen aiheuttamana, että painovoimaisesti. Havaitaan, että ilmavirrat ovat huomattavasti pienempiä verrattuna paineentasauskuiluissa kulkeviin ilmavirtoihin. Myös liukuporraskuiluissa ilmavirta vaihtaa suuntaa junaliikenteen aiheuttamana (paitsi Kivenlahden asemalla). Painovoimaisessa tilanteessa ilma virtaa liukuporraskuilujen kautta ainoastaan ulospäin.

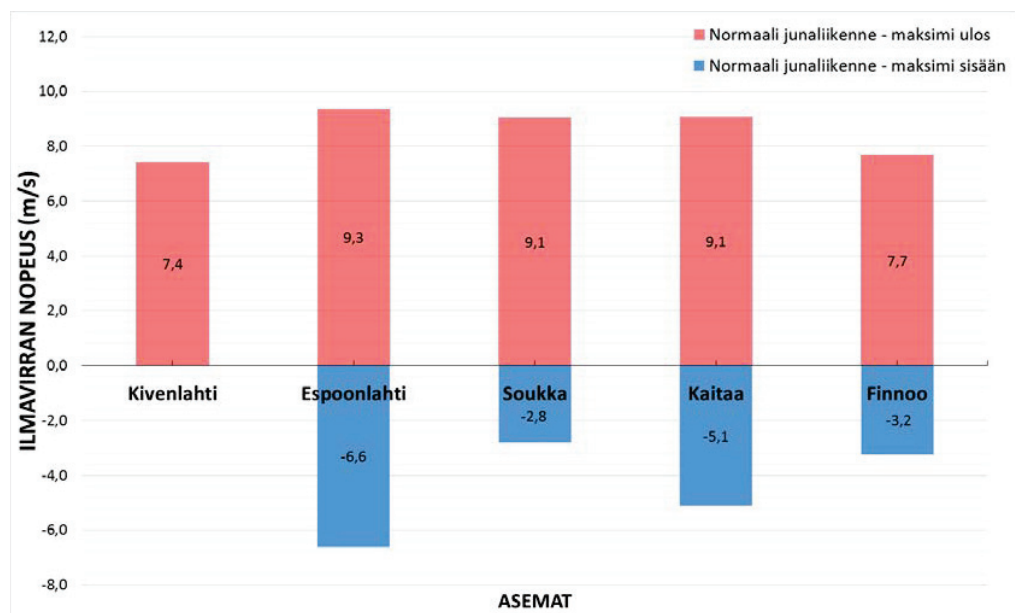


Kuva 33. Asemien liukuporraskuilujen ilmavirtojen (m³/s) suurimmat arvot mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junat kulkevat normaalisti.

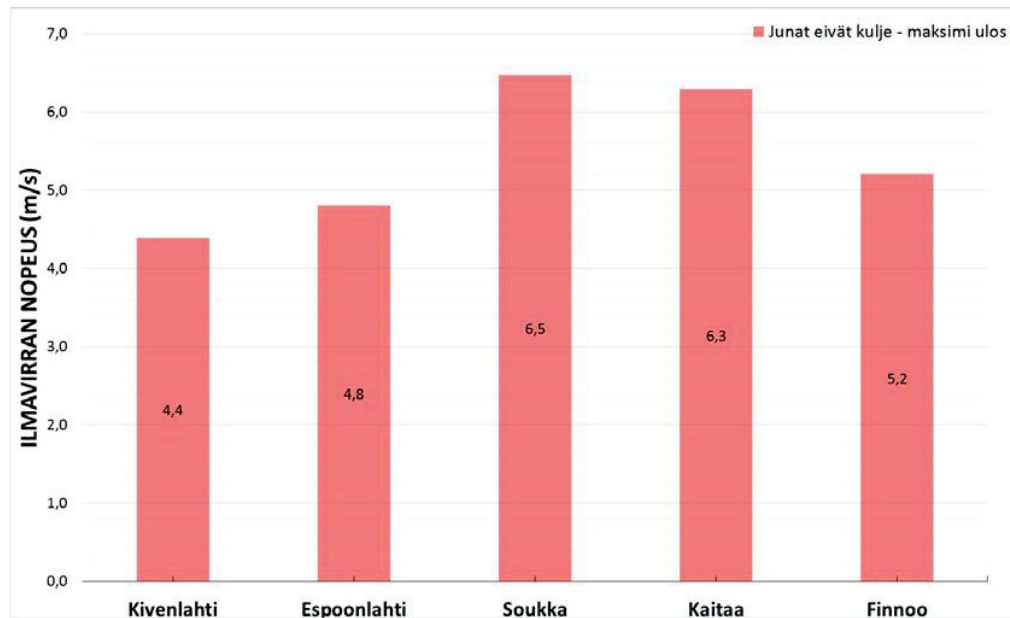


Kuva 34. Asemien liukuporraskuilujen ilmavirtojen (m³/s) suurimmat arvot mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junat eivät kulje.

Kuvissa 35 ja 36 esitetään asemien oviaukkojen ilmavirran nopeuksien suurimmat arvot sekä junaliikenteen aiheuttamana, että painovoimaisesti. Havaitaan, että junaliikenteen aiheuttama suurin hetkellinen ilmavirran nopeus 9,3 m/s saavutetaan Espoonlahden asemalla. Painovoimaisessa tilanteessa suurin ilmavirran nopeus 6,5 m/s saavutetaan Soukan asemalla.

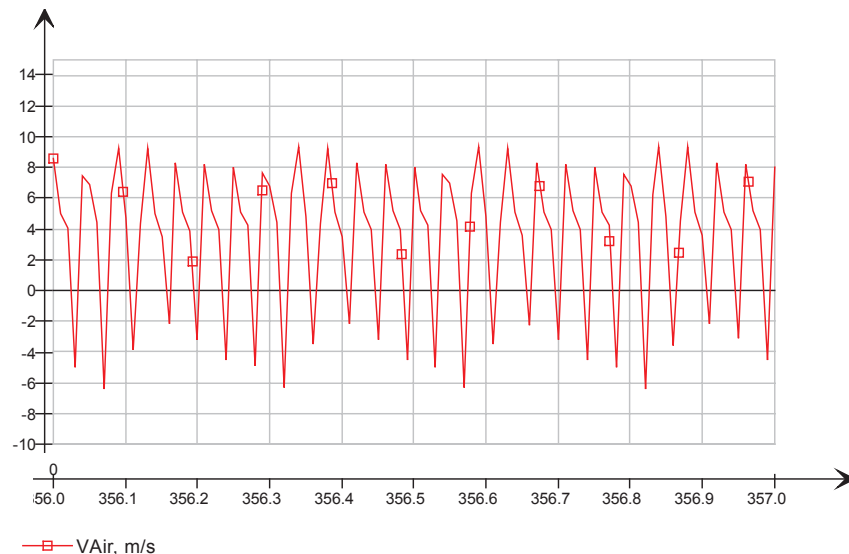


Kuva 35. Asemien oviaukkojen ilmavirran nopeuksien (m/s) suurimmat arvot mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junat kulkevat normaalisti.



Kuva 36. Asemien oviaukkojen ilmavirran nopeuksien (m/s) suurimmat arvot mitoituspakkassimuloinnin ensimmäisen vuorokauden aikana, kun junat eivät kulje.

Lisäksi kuvassa 37 esitetään ilmavirran nopeuden vaihtelu Espoonlahden aseman oviaukossa yhden tunnin aikana junaliikenteen aiheuttamana. Havaitaan, että ilmavirran nopeuden vaihtelu Espoonlahden aseman oviaukossa on seurausta samoista junaliikenteen aiheuttamista tekijöistä, jotka mainittiin paineentasauskuilujen osalta kohdassa 5.2.3.



Kuva 37. Ilmavirran nopeuden (m/s) vaihtelu Espoonlahden aseman oviaukossa yhden tunnin aikana (mitoituspakkassimuloinnin 1. vuorokausi klo 7-8).

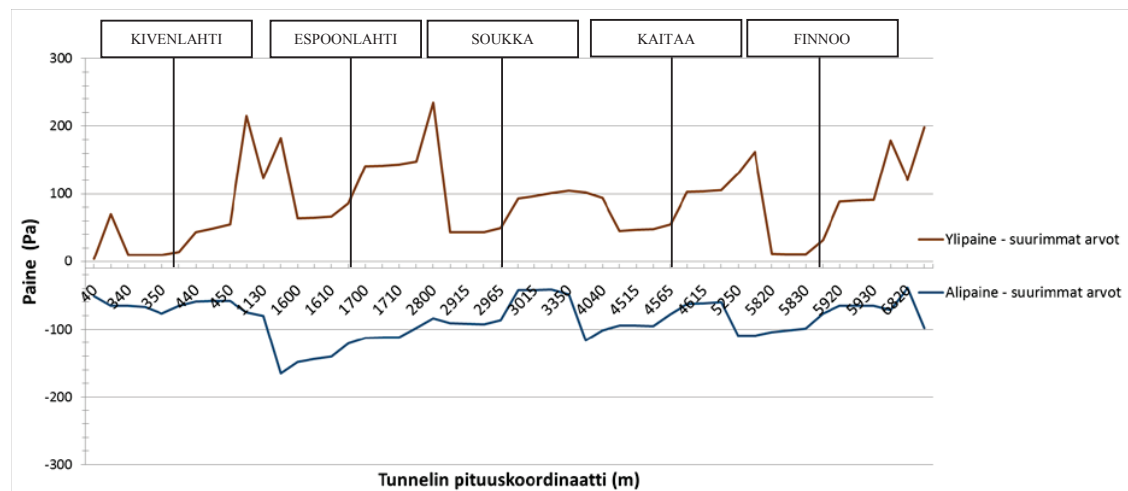
RATO:n ohjeissa todettiin, että ilman virtausnopeus oleskelualueilla ei saa ylittää arvoa 5 m/s. Poikkeustilanteissa ilman virtausnopeus saa hetkellisesti nousta arvoon 10 m/s. Oletetaan tässä, että -30°C -mitoituspakkasen aikana ilmavirran nopeuden sallitaan hetkellisesti nousta arvoon 10 m/s. Tällöin junaliikenteen aiheuttama suurin hetkellinen ilmavirran no-

peus 9,3 m/s (Espoonlahden asema) täyttää vielä RATO:n vaatimukset. Myöhemmin kappaleessa 6 tutkitaan, kuinka paljon oviaukkojen ilmavirran nopeudet kasvavat, kun säleikköjä kuristetaan vielä lisää.

5.2.5 Tunnelin paineenvaihtelut

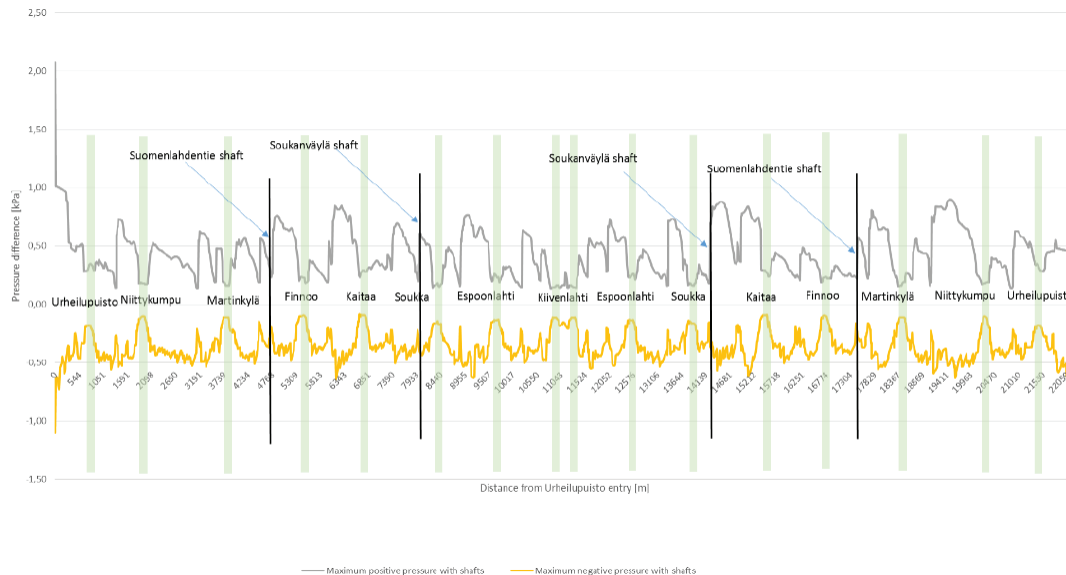
Tunnelissa liikkuva juna aiheuttaa tunneliin yli- ja alipaine kuormia, joiden suuruutta havainnollistetaan tässä alakappaleessa. Aiemmin kappaleessa 2.3.2 todettiin, että IDA Tunnel -ohjelma ei pysty ottamaan huomioon ilman kokoonpuristuvuudesta aiheutuvia nopeasti eteneviä paineaaltoja, joiden superpositio aiheuttaa hetkellisiä, pelkkää mäntäpainetta suurempia painepiikkejä tunnelissa. Näin ollen tämän työn simuloinneissa lasketut paineen lukuarvot koostuvat pelkästä junan aiheuttamasta mäntäpaineesta.

Länsimetron tunnelin painetasoja on kuitenkin aiemmin tutkittu myös ThermoTun-simulointiohjelmalla, joka pystyy mäntäpaineen lisäksi ottamaan huomioon paineaaltojen superposition tunnelissa (ThermoTun, 2016; Gawthorpe, 2000). Kuvissa 38 ja 39 esitetään junaliikenteen aiheuttamat suurimmat ylipaine- ja alipaineiskut Länsimetron tunnelissa IDA Tunnel -ohjelmalla sekä ThermoTun-ohjelmalla laskettuna. Näin voidaan arvioida superposition paineiskuja suurentavaa vaikutusta pelkkään mäntäpaineeseen verrattuna.



Kuva 38. Junaliikenteen aiheuttamat suurimmat ylipaine- ja alipaineiskut tunnelissa IDA Tunnel-ohjelmalla laskettuna.

Kuvasta 38 havaitaan, että mäntäpaineiskujen suurimmat arvot ovat ratatunneliosuudella asemien välissä. Suurin ylipaine kuorma (230 Pa) havaitaan Espoonlahden ja Soukan asemien välisellä tunneliosuudella. Puolestaan suurin alipaine kuorma (160 Pa) havaitaan Kivenlahden ja Espoonlahden asemien välissä. Asemia lähestyessään junat hidastavat kunnes lopulta pysähtyvät, jonka vuoksi asemilla paineiskut ovat pienempiä kuin tunnelissa. Kaikilla asemilla paineiskut ovat alle 100 Pa suuruusluokkaa (pois lukien Espoonlahden asema). Myöhemmin kappaleessa 6 tutkitaan, kuinka paljon tunnelin mäntäpaineiskut kasvavat, kun paineentasauskuilujen säleikköjä kuristetaan.



Kuva 39. Junaliikenteen aiheuttamat suurimmat ylipaine- ja alipaineiskut tunnelissa ThermoTun-ohjelmalla laskettuna (EQUA Simulation AB, 2016).

Kuvasta 39 havaitaan, että ThermoTun-ohjelmalla lasketut maksimaaliset yli- ja alipaineiskujen arvot ovat superposition vuoksi suurempia kuin IDA Tunnel -ohjelmalla lasketut pelkät mäntäpaineiskujen arvot. Nyt suurin ylipaineiskuorma (n. 0,9 kPa), ja suurin alipaineiskuorma (n. 0,6 kPa) havaitaan tunneliosuudella Kaitaan aseman molemmilla puolilla (kuva 39 esittää junan edestakaista matkaa tunnelissa alkaen ja päättyen Urheilupuiston aseman jälkeen olevalle kuvitteelliselle tunnelin suuaukolle, ks. kohta 4.4.1). (EQUA Simulation AB, 2016.)

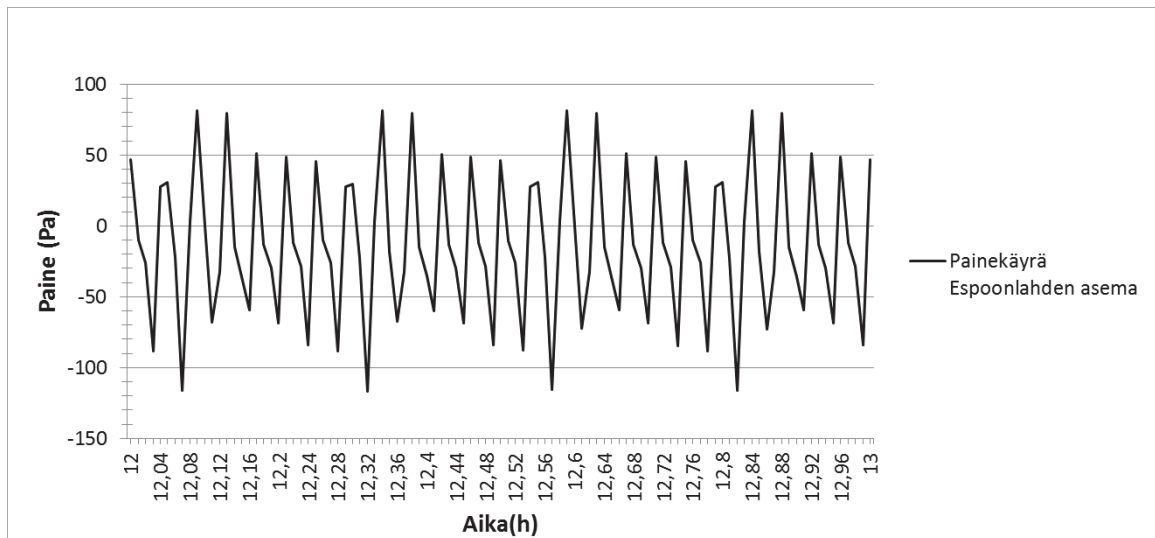
Tunnelin paineukuormamitoitus on syytä tehdä huomioiden paineaaltojen superpositio. Koska simuloinnin lähtötiedot sisältävät jossain määrin epätarkkuustekijöitä (esim. tunnelin ja kuilujen tarkkaa poikkileikkausprofiilia tai kuilujen tarkkoja pituuksia ei vielä tunneta), on maksimaalisten paineiskujen sijaintia vaikeaa arvioida tarkasti. Näin ollen paineukuormamitoitusta varten on turvallisinta käyttää koko tunneliverkostolle ThermoTun-ohjelmalla laskettuja suurimpia paineukuormia (suurin ylipaineiskuorma 0,9 kPa, ja suurin alipaineiskuorma 0,6 kPa).

Kappaleessa 3.2.3 käytiin aiemmin läpi, että mikäli tunnelikohtaista paineukuormien määrittästä ei tehdä, määrittää RATO paineukuormille valmiit mitoitusarvot. Esimerkiksi yksiraitaiselle tunnelille, jossa junan maksiminopeus on alle 160 km/h, on mitoittavat yli-, ja alipaineukuormat ± 4 kPa (Ratahallintokeskus, 2008). Simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että Länsimetron tunnelin paineukuormamitoitus voitaisiin tehdä huomattavasti RATON suositusarvoja kevyemmin. Toisaalta, kun paineentasauskuilujen säleikköjä kuristetaan lisää, on tilanne tarkistettava uudelleen.

Koska tämän työn myöhempiä painelaskelmia varten ei ole käytettävissä ThermoTun-ohjelmalla laskettuja tuloksia, on superposition vaikutus arvioitava karkeasti IDA Tunnel -ohjelman tuloksista. Kun verrataan keskenään junaliikenteen aiheuttamia suurimpia ylipaine- ja alipaineukuormia IDA Tunnel- ja ThermoTun -ohjelmalla laskettuna, havaitaan, että superpositio voi kasvattaa paineiskun suurimmillaan n. 4-kertaiseksi pelkkään

mäntäpaineiskuun verrattuna (suurin ylipainekuorma 0,23 kPa:sta 0,9 kPa:han, ja suurin alipaine kuorma 0,16 kPa:sta 0,6 kPa:han). Kun tämän työn myöhemmissä painelaskelmissa painekäyrien arvot kerrotaan 4:llä, saadaan karkea arvio tunnelin todellisista ylipaine- ja alipaineiskuista.

Asemalaiturilla junaa odottavien ihmisten kokemia paineenvaihteluja on syytä tarkastella dynaamisesti. Tutkitaan tunnelin maksimaalisten paineiskujen lisäksi lyhyen aikavälin paineamplitudin suuruutta metrolaiturilla. Esimerkin omaisesti tarkastellaan Espoonlahden metroasemaa, koska kyseisen aseman paineiskut ovat hieman suurempia kuin muiden asemien (IDA Tunnel ohjelmalla laskettuna). Kuvassa 40 havainnollistetaan junaliikenteen aiheuttamaa paineenvaihtelua yhden tunnin aikana Espoonlahden asemalla.



Kuva 40. Junaliikenteen aiheuttama paineenvaihtelu Espoonlahden asemalla yhden tunnin aikana IDA Tunnel –ohjelmalla laskettuna.

Kuvasta 40 havaitaan, että lyhyen aikavälin paineenvaihtelun amplitudi (positiivisen ja negatiivisen paineen huippuarvojen ero) Espoonlahden aseman metrolaiturilla on suurimmillaan 0,2 kPa. Jos käytetään paineaaltojen superposition korjauskerrointa 4, saadaan huippuarvojen eroksi 0,8 kPa. Oleellista on tietää myös paineen muutosnopeus. Tässä aika positiivisen ja negatiivisen paineen huippuarvojen välillä on junien vuoroväli jaettuna kahdella, eli 75 sekuntia. Näin ollen paineen muutosnopeudeksi saadaan 0,01 kPa/s, ja vastaavasti neljässä sekunnissa muutos on 0,04 kPa. RATO-ohjeissa paineenvaihtelun amplitudin muutosnopeudelle oli määritetty seuraavat raja-arvot: 1 sekunnin aikana $\max \Delta P = 0,5$ kPa ja 4 sekunnin aikana $\max \Delta P = 1,5$ kPa. Tällä tavalla arvioituna Länsimetron tunneleissa oltaisiin vielä kaukana RATO:n määrittämistä paineen raja-arvoista. On syytä kuitenkin huomioda, että todellisuudessa paineaaltojen superpositio aiheuttaa junien vuorovälejä nopeamman paineenvaihtelun syklin (EQUA Simulation AB, 2016). Todellisuudessa Länsimetron maksimaalinen paineenvaihtelun amplitudi 0,8 kPa saattaa tapahtua muutamissa sekunneissa. Oletetaan tässä, että paineenvaihtelun amplitudi 0,8 kPa tapahtuisi RATO:n ohjeistaman 4 sekunnin aikana, jolloin paineenvaihtelun amplitudin raja-arvona käytetään 1,5 kPa. Tällöinkin oltaisiin vielä turvallisesti hyväksyttävien rajojen sisällä. Seuraavassa kappaleessa tutkitaan säleikköjen kuristamisen vaikutusta paineenvaihtelun amplitudin muutoksiin.

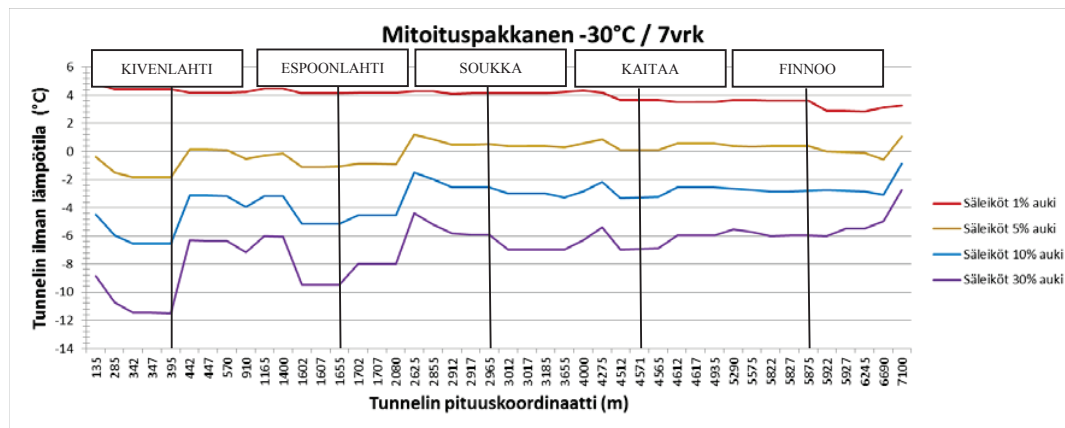
6 Kuilujen säleikköjen optimaalisen kuristusalueen määrittäminen

Kappaleessa 5 tehdyssä metrotunnelin olosuhdeanalyysissä pidettiin säleiköt jatkuvasti perusasennossaan, eli päivällä 30% auki ja yöllä kiinni. Havaittiin, että tunneliverkoston jäähtymä on kovalla pakkasella melko voimakasta, johtuen paineentasauskuilujen sekä liukuporraskuilujen kautta kulkevista suurista ilmavirtauksista. Lisäksi todettiin, että tunnelin aerodynaamiset tunnusluvut (ilmavirran nopeudet sekä paineiskut) pysyvät hyväksyttävissä rajoissa, jos säleikköjä pidetään kovalla pakkasella perusasennossaan. Näin ollen on mielekästä selvittää, kuinka paljon säleikköjä on mahdollista kuristaa lisää siten, että tunnelin jäähtymä olisi pienempi mutta aerodynaamiset olosuhteet vielä juuri ja juuri pysyisivät hyväksyttävissä rajoissa.

Tässä kappaleessa säleiköille haetaan optimaalista kuristusaluetta, jolloin säleikköjen asentoa vaihdellaan päivisin joko 30%, 10%, 5% tai 1%. Öisin säleiköt ovat aina kiinni. Simulointien yksinkertaistamiseksi tutkitaan ainoastaan sellaisia tilanteita, joissa kaikilla säleiköillä on keskenään sama aukioloprosentti. Säleikköjen kuristussimuloinneissa junat liikennöivät normaalisti.

6.1 Lämpötilaprofiili

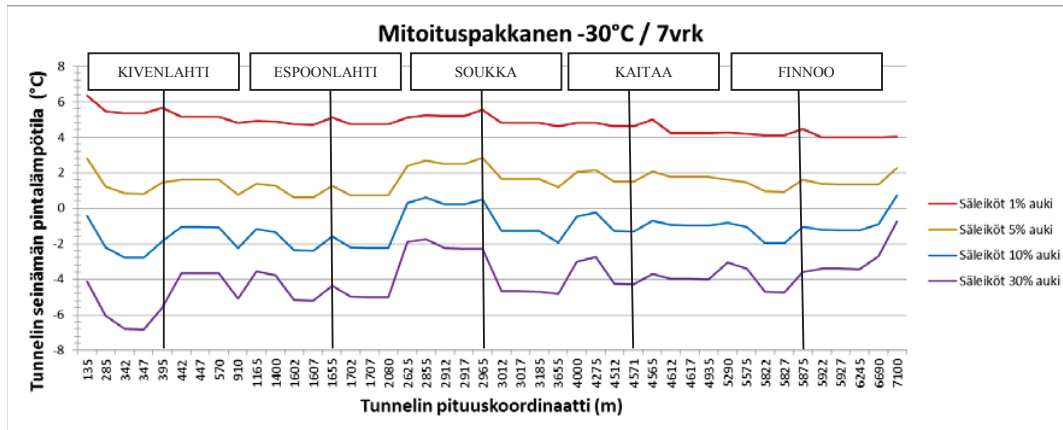
Tutkitaan aluksi tunneliverkoston lämpötilaprofiilien muutoksia, kun säleikköjä kuristetaan. Kuvassa 41 esitetään tunnelin ilman lämpötilaprofiili (-30°C / 7vrk), kun säleikköjen aukioloprosenttia vaihdellaan joko 30%, 10%, 5% tai 1%.



Kuva 41. Tunnelin ilman lämpötilan riippuvuus kuilujen säleikköjen aukioloprosentista.

Kuvasta 41 havaitaan, että tunnelin ilman lämpötila kohoaa säleikköjä kuristettaessa $2\text{--}6^{\circ}\text{C}$ jokaista kuristuspykälää kohti. 30% kuristuksella on tunnelin ilman lämpötila välillä -3°C – -12°C , 10% kuristuksella -1°C – -7°C , 5% kuristuksella $+1^{\circ}\text{C}$ – -2°C ja lopulta 1% kuristuksella $+5^{\circ}\text{C}$ – $+3^{\circ}\text{C}$. Näin ollen 5% kuristuksella tunnelin ilman lämpötila pysyy osassa tunnelia plussan puolella, ja pakkasen puolelle jäähtyvissäkin osissa on pakkanen kovimmillaan vain -2°C .

Kuvassa 42 esitetään tunnelin seinämän pintalämpötilaprofiili (-30°C / 7vrk), kun säleikköjen aukioloprosenttia vaihdellaan joko 30%, 10%, 5% tai 1%.



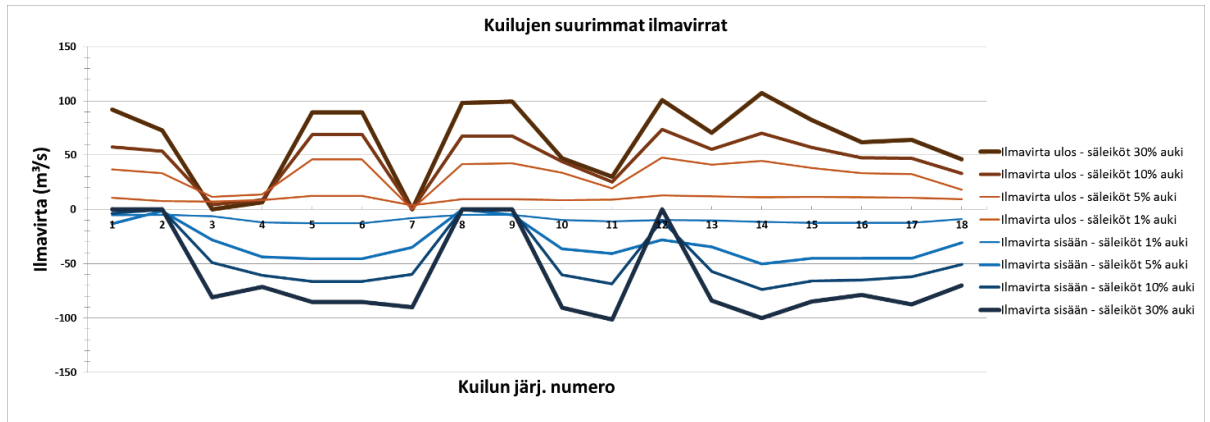
Kuva 42. Tunnelin seinämän pintalämpötilan riippuvuus kuilujen säleikköjen aukioloprosentista.

Kuvasta 42 havaitaan, että tunnelin seinämän pintalämpötila kohoaa säleikköjä kuristettaessa 2-4°C jokaista kuristuspykälää kohti. 30% kuristuksella on tunnelin seinämän pintalämpötila välillä -1°C – -7°C, 10% kuristuksella +1°C – -3°C, 5% kuristuksella +3°C – +1°C ja lopulta 1% kuristuksella +6°C – +4°C. Näin ollen säleiköt saavat olla korkeintaan 5% auki jotta tunnelin seinämän pintalämpötila pysyy kauttaaltaan plussan puolella koko mitoituspakkanajakson ajan.

6.2 Ilmavirrat

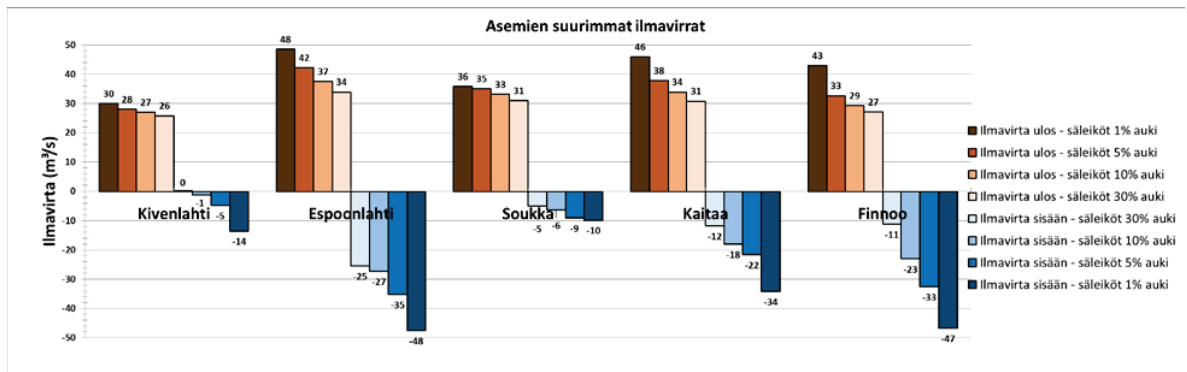
Säleikköjen kuristaminen pienentää paineentasauskuilujen kautta kulkevia ilmavirtauksia, mutta kasvattaa samalla metroasemien liukuporraskuilujen ilmavirtoja, koska junien työntämä / imemä ilmavirtaus pyrkii hakemaan korvaavia virtausreittejä säleikköjen kuristuksen myötä. Näin ollen säleikköjä kuristettaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota liukuporraskuilujen kautta kulkeviin virtausreitteihin. Metroaseman maanpäällisissä oviaukoissa havaitaan tällöin suurempia ilmavirran nopeuksia. Lisäksi liukuporraskuilujen kautta kulkevien virtausreittien varrella olevat metroaseman maanpäälliset tilat kärsivät tällöin suuremmasta jäähtymästä (maanpäällisten tilojen jäähtymisen selvittäminen on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle).

Kuvassa 43 esitetään paineentasauskuilujen kautta kulkevat suurimmat ilmavirrat, kun kuilujen säleikköjen aukioloprosenttia vaihdellaan joko 30%, 10%, 5% tai 1%. Kuvasta havaitaan, miten kuilujen ilmavirrat pienenevät kun säleikköjen aukioloa kuristetaan.



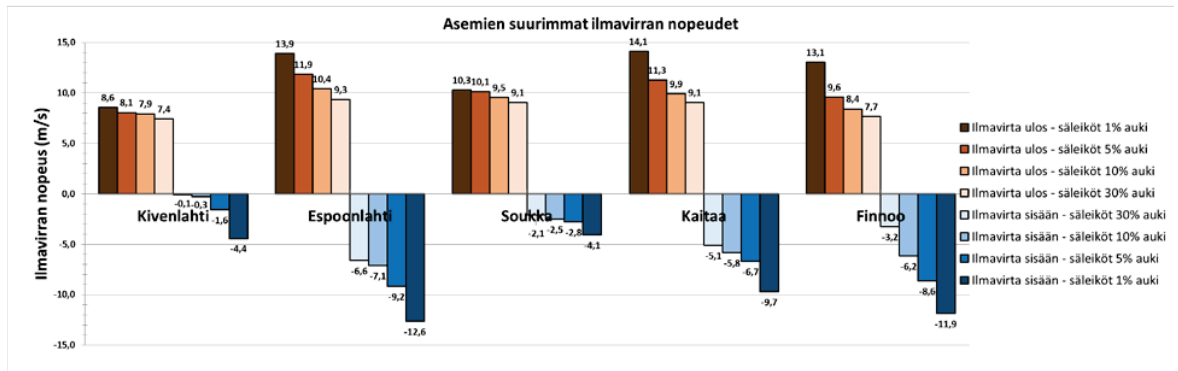
Kuva 43. Kuilujen ilmavirtojen vaihteluvälin (suurin arvo ulos / suurin arvo sisään) riippuvuus kuilujen säleikköjen aukioloprosentista.

Kuvassa 44 esitetään asemien liukuporraskuilujen kautta kulkevat suurimmat ilmavirrat, kun paineentasauskuilujen säleikköjen aukioloprosenttia vaihdellaan joko 30%, 10%, 5% tai 1%. Kuvasta havaitaan, miten liukuporraskuilujen ilmavirrat kasvavat kun paineentasauskuilujen säleikköjen aukioloa kuristetaan.



Kuva 44. Asemien liukuporraskuilujen ilmavirtojen vaihteluvälin (suurin arvo ulos / suurin arvo sisään) riippuvuus paineentasauskuilujen säleikköjen aukioloprosentista.

Kuvassa 45 esitetään asemien oviaukkojen suurimmat ilmavirran nopeudet, kun paineentasauskuilujen säleikköjen aukioloprosenttia vaihdellaan joko 30%, 10%, 5% tai 1%. Kuvasta havaitaan, miten oviaukkojen ilmavirran nopeudet kasvavat kun paineentasauskuilujen säleikköjen aukioloa kuristetaan.



Kuva 45. Asemien oviaukkojen ilmavirran nopeuksien vaihteluvälin (suurin arvo ulos / suurin arvo sisään) riippuvuus paineentasauskuilujen säleikköjen aukiolo prosentista.

Kuvan 45 ilmavirran nopeuden arvoja voidaan verrata RATO:n ohjeistukseen, jossa poikkeustilanteen ilmavirran nopeus saa hetkellisesti nousta arvoon 10 m/s. Havaitaan, että 30% kuristuksella ilman virtausnopeus pysyy alle 10 m/s kaikilla asemilla. Myöskään 10% kuristuksella ilman virtausnopeus ei ylitä arvoa 10 m/s muualla kuin Espoonlahden asemalla, jossa nopeus on suurimmillaan 10,4 m/s. Sen sijaan 5% kuristuksella ilmavirran nopeus ylittää 10 m/s jo kolmella asemalla. 1% kuristuksella nopeudet ylittyvät kaikilla muilla paitsi Kivenlahden asemalla.

Asemien ilmavirran nopeuksien tarkastelun perusteella sopiva mitoituspakkasjakson säleikköjen kuristustaso voisi olla 10%, jos hyväksytään ilmavirran nopeuden pieni ylitys 10,4 m/s Espoonlahden asemalla. Tätä kovempi kuristus nostaisi nopeuksia jo jonkin verran yli RATO:n ohjearvon. 10% kuristus nostaa mitoituspakkasjakson tunnelin lämpötiloja 2-5°C verrattuna säleikköjen 30% kuristukseen, mutta tämä ei kuitenkaan riitä pitämään tunnelin lämpötilaa plussan puolella, joten pakkassuojausta edelleen tarvitaan.

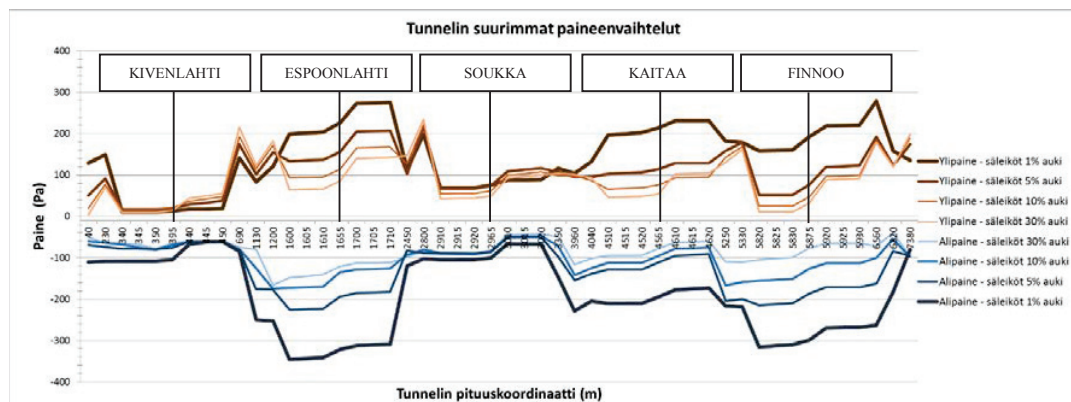
Sen sijaan 5% kuristuksella tunnelin seinämän pintalämpötila pysyisi kauttaaltaan plussan puolella, ja tunnelin ilman lämpötilakin pysyisi osassa tunnelia plussan puolella ja pakkasen puolelle jäätyvissäkin osissa olisi pakkanen kovimmillaan vain -2°C. Tämän vuoksi olisikin syytä harkita, voidaanko kovan pakkasjakson aikana poiketa RATO:n määrittämistä ilmavirran nopeuksien ohjearvoista, ja sallia nopeuksien hetkellinen nousu lähemmäs 12 m/s. Tämän muutoksen hyväksyminen vähentäisi huomattavasti tunnelin pakkassuojauksen tarvetta, mikä intuitiivisesti tuntuisi tärkeämmältä tekijältä kuin nopeuksien rajoittaminen. Toisaalta tällöin olisi myös varmistettava, ettei RATO:n ilmavirran nopeuksien ohjearvojen ylittäminen kohtuuttomasti häiritse matkustajien viihtyvyyttä.

Tähän liittyen mahdollisena myöhemmänä jatkotutkimusaiheena voisi lisäksi selvittää, kuinka paljon hyötyä saavutettaisiin sillä, että kutakin säleikköä säädettäisiin tarpeen mukaan erikseen. Näin ollen kaikkien säleikköjen ei tarvitsisi olla samassa asennossa, vaan jotkut säleiköt voisivat olla esim. 10% auki, osa 5% auki ja loput täysin kiinni.

6.3 Paineenvaihtelut

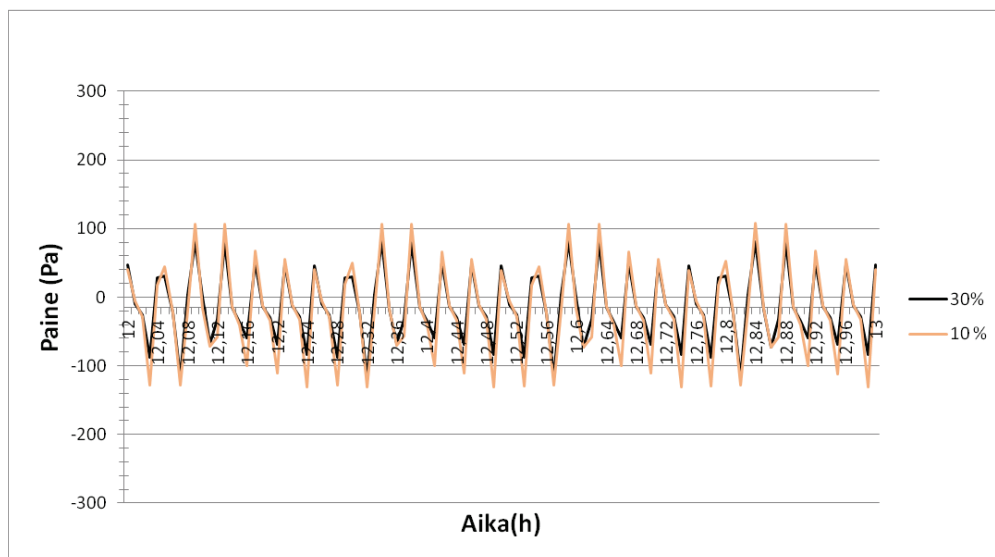
Tässä osassa selvitetään säleikköjen kuristamisen vaikutus tunnelin maksimaalisiin ylipaine- ja alipaine kuormien muutoksiin, sekä paineenvaihtelun amplitudin muutoksiin. Kuvassa 46 esitetään junaliikenteen aiheuttamien ylipaine- ja alipaine kuormien riippuvuus kuilujen säleikköjen aukiolo prosentista. Todetaan aluksi, että säleikköjen kuristaminen havaitaan paineiskujen nousuna vain osassa tunneliverkostoa, kun taas joissain tunnelin osissa säleikköjen kuristamisella ei ole juurikaan vaikutusta. Eniten säleikköjen kuristaminen vaikuttaa painetasoihin Espoonlahden, Kaitaan sekä Finnoon asemien ympäristössä. Sen sijaan Kivenlahden ja Soukan asemien ympäristössä säleikköjen kuristamisella on hyvin vähäinen vaikutus. Tässä työssä ei perehdytä sen syvällisemmin siihen, miksi tunnelin painekuormaprofiilit käyttäytyvät säleikköjä kursitettaessa kuten kuvassa 46 havaitaan. Sen sijaan tyydytään toteamaan, että Espoonlahden aseman ympäristössä havaitaan suurimmat muutokset painekuormiin kuristuksen myötä.

Kun säleikköjen kuristus on maksimaalinen 1%, on tunneliverkoston suurin ylipaine kuorma 270 Pa, ja suurin alipaine kuorma 350 Pa. Kun vielä käytetään paineaaltojen superposition korjauskerrointa 4 (ks. kohta 5.2.5), on vastaavat luvut 1,1 kPa ja 1,4 kPa. Näin ollen Länsimetron tunnelin turvallinen painekuormamitoitus voisi olla esimerkiksi ± 2 kPa (RATON suositusarvo tunnelille, jolle ei ole tehty erikseen painesimulointeja on ± 4 kPa).

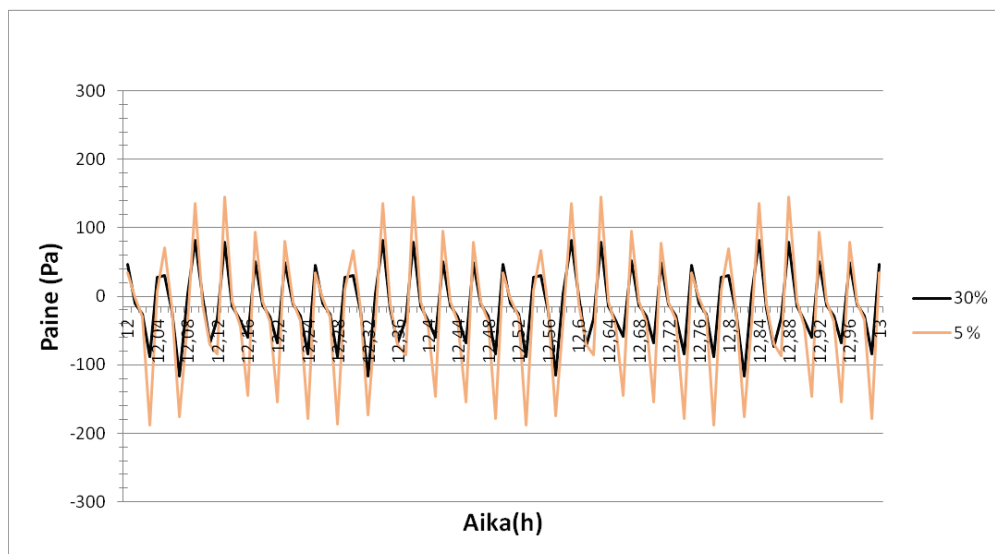


Kuva 46. Junaliikenteen aiheuttamien maksimaalisten ylipaine- ja alipaineiskujen riippuvuus kuilujen säleikköjen aukiolo prosentista.

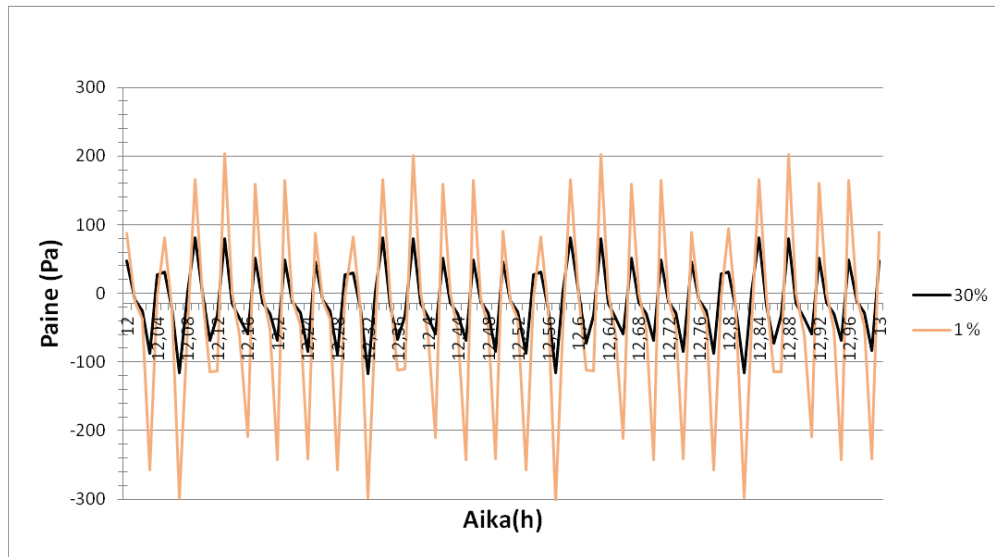
Säleikköjen kuristus kasvattaa lyhyen aikavälin paineamplitudin suuruutta asemalaiturilla. Kuvissa 47, 48 ja 49 havainnollistetaan, kuinka paljon paineenvaihtelun amplitudi kasvaa, kun säleikköjen kuristusta kasvatetaan 30%:sta 10%:iin, 5%:iin ja lopulta 1%:iin.



Kuva 47. Sälleikkökuristuksen kasvattamisen (30%:sta 10%:iin) vaikutus paineenvaihtelun amplitudiin Espoonlahden asemalla yhden tunnin aikana.



Kuva 48. Sälleikkökuristuksen kasvattamisen (30%:sta 5%:iin) vaikutus paineenvaihtelun amplitudiin Espoonlahden asemalla yhden tunnin aikana.



Kuva 49. Säleikkökuristuksen kasvattamisen (30%:sta 1%:iin) vaikutus paineenvaihtelun amplitudiin Espoonlahden asemalla yhden tunnin aikana.

Kuvasta 47 havaitaan, että säleikkökuristuksen kasvattaminen 30%:sta 10%:iin nostaa suurimman paineenvaihtelun amplitudin Espoonlahden asemalla 0,2 kPa:sta 0,24 kPa:han. Paineaaltojen superposition korjauskertoimen kanssa muutos on 0,8 kPa:sta 1,0 kPa:han.

Kuvasta 48 havaitaan, että säleikkökuristuksen kasvattaminen 30%:sta 5%:iin nostaa suurimman paineenvaihtelun amplitudin 0,2 kPa:sta 0,31 kPa:han. Paineaaltojen superposition korjauskertoimen kanssa muutos on 0,8 kPa:sta 1,2 kPa:han.

Kuvasta 49 havaitaan, että säleikkökuristuksen kasvattaminen 30%:sta 1%:iin nostaa suurimman paineenvaihtelun amplitudin 0,2 kPa:sta 0,46 kPa:han. Paineaaltojen superposition korjauskertoimen kanssa muutos on 0,8 kPa:sta 1,8 kPa:han.

Oletetaan tässä, että paineenvaihtelun muutos aika tapahtuisi RATON:n ohjeistaman 4 sekunnin aikana, jolloin paineenvaihtelun amplitudin raja-arvona käytetään 1,5 kPa. Näin ollen ainoastaan 1% kuristuksella raja-arvo 1,5 kPa ylittyisi 0,3 kPa:n verran, jolloin paineenvaihtelut rajoittaisivat maksimaalisen säleikkökuristuksen 5%:iin. Kohdassa 6.2 kuitenkin osoittautui, että säleikkökuristuksen rajoittava aerodynaaminen tekijä on asemien ilmavirran nopeudet, sillä ne rajoittaisivat säleikköjen kuristustason 10%:iin. Toisaalta myös ilmavirran nopeuksien kannalta 5%:n säleikkökuristusta voitaisiin harkita, sillä se vähentäisi huomattavasti tunnelin pakkassuojauksen tarvetta. Tällöin pitäisi kuitenkin varmistaa, ettei RATO:n ilmavirran nopeuksien ohjearvojen ylittäminen kohtuuttomasti häiritse matkustajien viihtyvyyttä.

On lisäksi huomioitava, että IDA Tunnel-ohjelman painelaskelmien tulokset ovat karkeita arvioita tunnelin todellisista paineiskuista (ks. kohta 5.2.5). Ennen kuin 5%:in säleikkökuristusta voitaisiin todellisuudessa käyttää, olisi tulokset hyvä tarkistaa esim. ThermoTunnel-ohjelman avulla. Painelaskelmien tulosten oikeellisuuden varmistaminen on tärkeää, sillä liian suuret paineiskut saattavat pahimmassa tapauksessa vaarantaa matkustajien terveyden, tai vahingoittaa esimerkiksi laituritasolla olevia herkkiä rakenteita (Gawthorpe, 2000; Ko, et al., 2012).

7 Kuilujen säleikköjen tarpeenmukainen aukiolon ohjaus

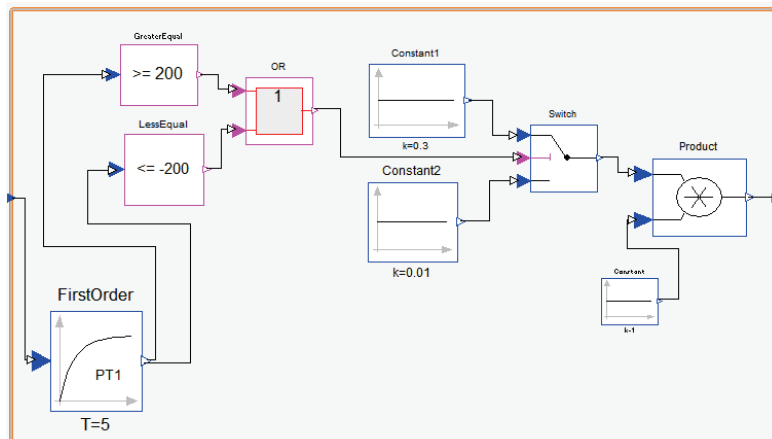
Edellisessä kappaleessa tutkittiin säleikköjen optimaalista vakio-aukioloprosenttia, jolla tunnelin jäähtymää saatiin kovalla pakkasella pienemmäksi siten, että aerodynaamiset olosuhteet vielä pysyivät sallituissa rajoissa. Ajatusta säleikköjen optimaalisesta asennosta voidaan viedä pidemmälle siten, että säleiköt olisivatkin tietyn vakio-asennon sijaan lähtökohtaisesti aina kiinni, mutta ne avautuisivat tarpeen mukaan aina tunnelin paineen noustessa valitun raja-arvon yli.

Tässä kappaleessa tutkitaan tilannetta, jossa säleikköjen aukioloa ohjataan yli- tai alipaineen avulla. Paineohjatut säleiköt ovat lähtökohtaisesti aina kiinni, mutta kun valittu paineen raja-arvo (yli- tai alipaine) ylittyy, aukeavat säleiköt 30%:iin asti, mikä vastaa säleikköjen normaalin käyttöajan aukiolon arvoa. Kun säleikköjen avautumisen jälkeen paine jälleen putoaa alle raja-arvon, menevät säleiköt takaisin kiinni.

7.1 Säleikköjen paineohjauksen mallintaminen

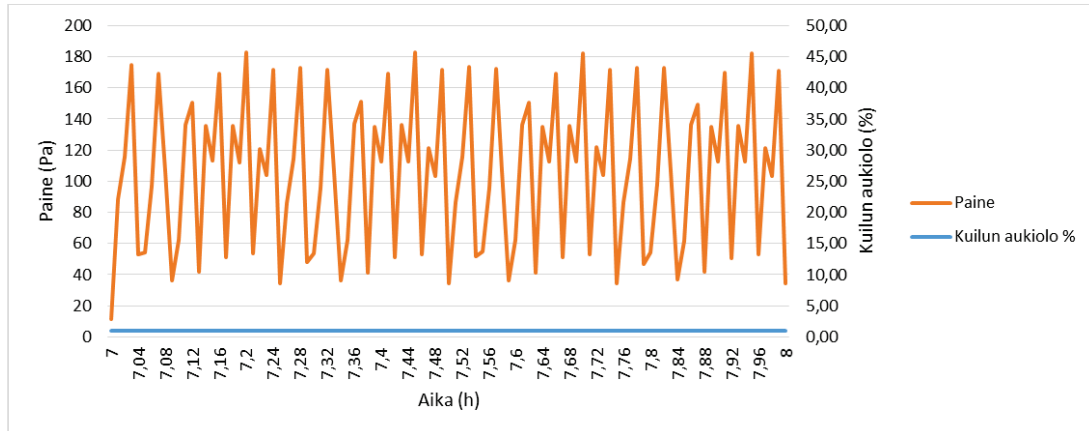
Todellisuudessa paineen perusteella ohjautuva säleikkö voisi olla rakenteeltaan esimerkiksi molempiin suuntiin avautuva ”läppä”, joka reagoi sekä työntö-, että imuvirtauksiin. Tässä työssä ei kuitenkaan syvennytä paineohjatun säleikön mahdollisiin käytännön toteutusratkaisuihin, vaan tarkoituksena on ainoastaan selvittää paineohjauksen mahdollisia hyötyjä tunnelin olosuhdehallinnassa kylmän pakkasjakson aikana.

Paineohjaus on IDA Tunnel –ohjelmassa mallinnettu makron avulla. Makro mittaa tunnelin painetta paineentasauskuilussa, jonka jälkeen se antaa säleikölle käskyn olla joko 30% auki tai 1% auki sen perusteella, onko paine raja-arvojen sisällä. Paineen raja-arvoksi on tässä valittu ± 200 Pa (paineaaltojen superposition korjauskerroin huomioiden raja-arvo olisi ± 800 Pa). Jos yli- tai alipaine on suurempi kuin 200 Pa, on säleikkö 30% auki, ja raja-arvojen sisällä säleikkö on puolestaan kiinni. Jokaiselle säleikölle (18 kpl) on mallinnettu oma makronsa. Simulointien yksinkertaistamiseksi kaikille säleikölle käytetään samaa raja-arvoa ± 200 Pa. Raja-arvon valinta on tehty aikaisempien simulointitulosten perusteella, ja se vastaa lähes maksimaalista yli- tai alipaineiskua tunnelissa, kun kaikki säleiköt ovat 30% auki (ks. kuva 38). Kuvassa 50 esitetään säleikköä ohjaavan makron komponentit.



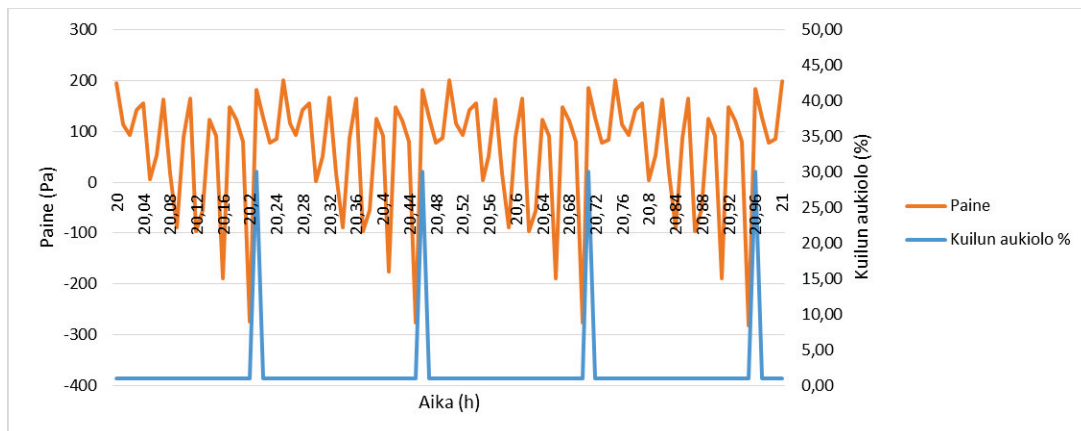
Kuva 50. Säleikön paineohjausta simuloivan makron kaaviokuva IDA Tunnel –ohjelmassa.

Kuvissa 51- 55 esitetään kuilujen 2,4,9,11 ja 15 paineohjauksen toteutuminen yhden tunnin tarkastelujakson ajalta (kuilut on aiemmin numeroitu kuvassa 11). Kuvissa sininen käyrä kuvaa kuilun aukioloprosenttia, joka on arvoltaan joko 1% tai 30% riippuen siitä miten kyseisen kuilun kohdalla painetasot vaihtelevat tarkastelujakson aikana. Makron on oletettu toimivan ideaalisesti ilman aikaviivettä, eli tällöin säleikkö reagoi välittömästi havaittuihin paineenmuutoksiin. On kuitenkin huomattava, että tässä työssä suoritettujen simulointien aika-askeleena on käytetty 0,01 h eli 36 sekuntia, mikä ei täysin riitä antamaan tarkkaa kuvaa painenvaihtelun dynamiikasta. Vaikka itse makro toimiikin ilma aikaviivettä, tuloksissa säleikön avautuminen tai sulkeutuminen kestää näin ollen 36 sekuntia, ja edestakainen liike 72 sekuntia.



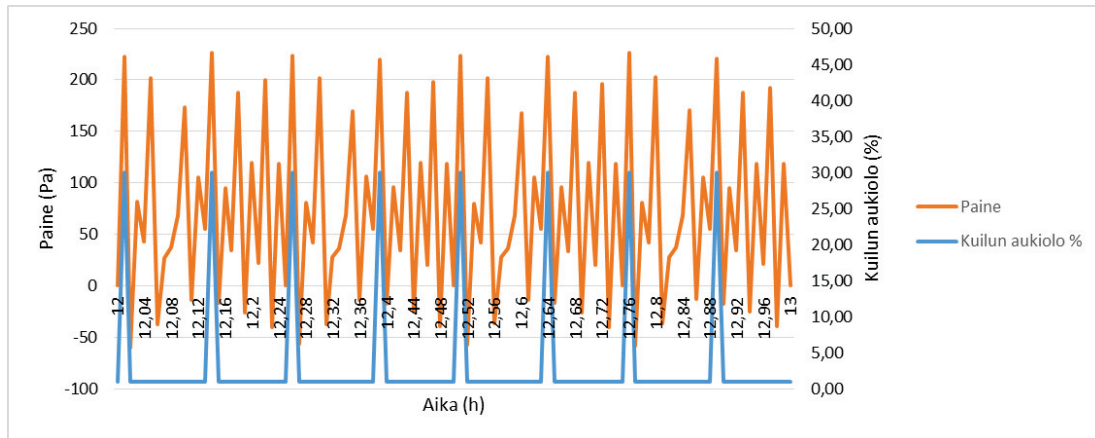
Kuva 51. Kuilun nro 2 paineohjaus.

Kuvassa 51 kuilun nro 2 säleikkö pysyy jatkuvasti kiinni, sillä paine kuilussa pysyy yhden tunnin pituisen tarkastelujakson aikana jatkuvasti rajojen ± 200 Pa sisäpuolella.



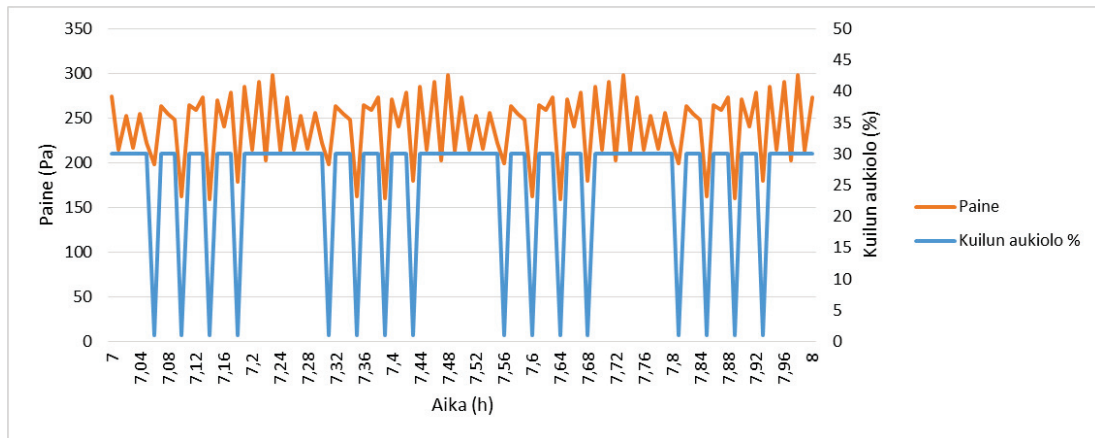
Kuva 52. Kuilun nro 4 paineohjaus.

Kuvassa 52 kuilun nro 4 säleikkö pysyy pääpiirteittäin kiinni, mutta avautuu yhden tunnin pituisen tarkastelujakson aikana muutamia kertoja raja-arvon ylittävän alipaineen seurauksena.



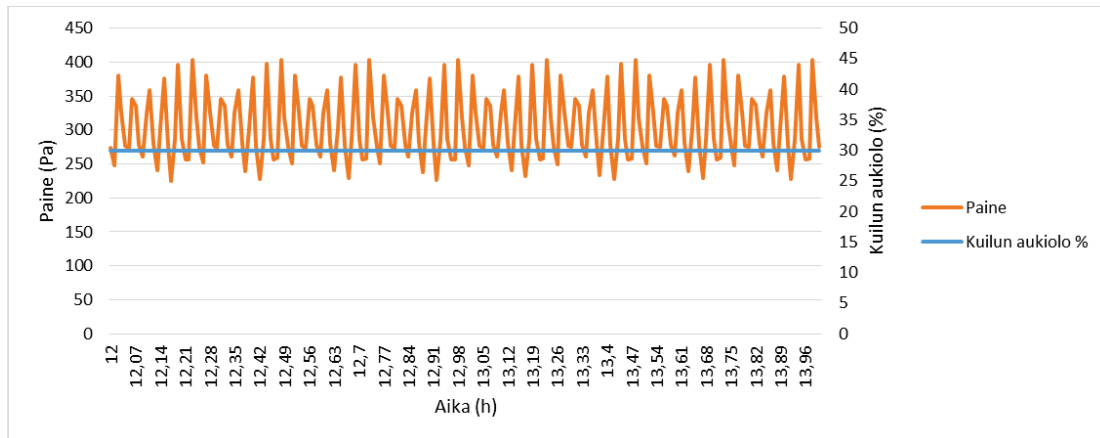
Kuva 53. Kuulun nro 9 paineohjaus.

Kuvassa 53 kuulun nro 9 säleikkö pysyy pääpiirteittäin kiinni, mutta avautuu yhden tunnin pituisen tarkastelujakson aikana muutamia kertoja raja-arvon ylittävän ylipaineen seurauksena.



Kuva 54. Kuulun nro 11 paineohjaus.

Kuvassa 54 kuulun nro 11 säleikkö pysyy lähes jatkuvasti auki, koska yhden tunnin pituisen tarkastelujakson aikana kuilussa vallitsee lähes jatkuva ylipaine, joka muutamia kertoja laskiessaan alle 200 Pa saa säleikön hetkeksi sulkeutumaan.



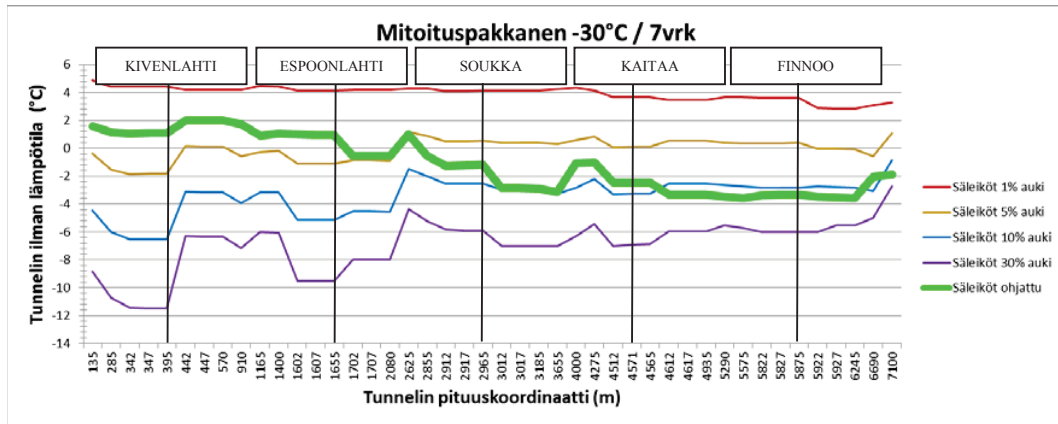
Kuva 55. Kuilun nro 15 paineohjaus.

Kuvassa 55 kuilun nro 15 säleikkö pysyy jatkuvasti auki, koska yhden tunnin pituisen tarkastelujakson aikana kuilussa vallitsee jatkuva raja-arvot ylittävä ylipaine.

Säleikköjen 2,4,9,11 ja 15 tarkastelun jälkeen voidaan todeta, että Länsimetro vaihe 2 – tunnelin läntisessä osassa (kuilut 2,4 ja 9) kuilujen painetasot pysyvät keskimäärin raja-arvojen ± 200 Pa sisäpuolella, jolloin säleikötkin ovat keskimäärin enemmän kiinni kuin auki. Tunnelin itäisessä osassa (kuilut 11 ja 15) kuilujen painetasot puolestaan vaikuttaisivat keskimäärin olevan raja-arvoja suurempia, jolloin säleikköjen on oltava enemmän auki kuin kiinni. Tämä voidaan myös havaita tunnelin lämpötilajakaumassa, jota tutkitaan seuraavassa alakappaleessa.

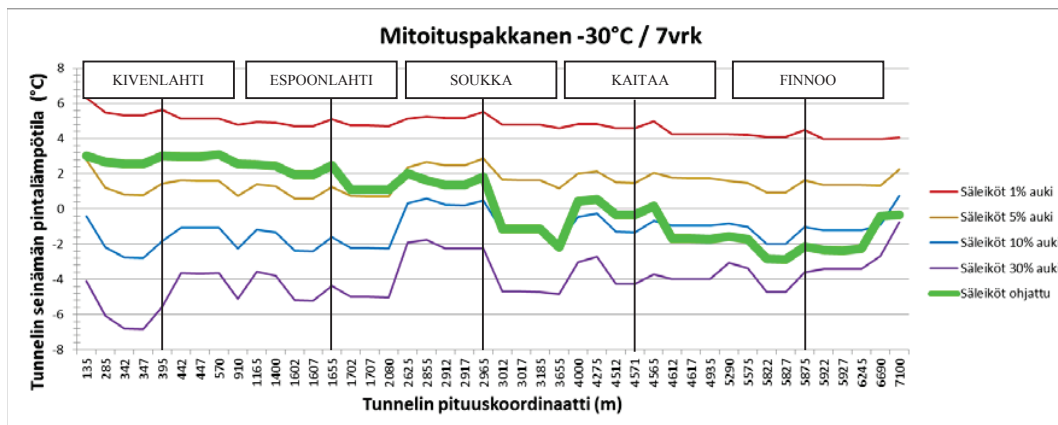
7.2 Säleikköjen paineohjauksen vaikutus metrotunnelin olosuhteisiin

Kuvissa 56 ja 57 vertaillaan tunnelin lämpötilaprofiileja säleikköjen eri vakio-assennoilla (30%, 10%, 5% ja 1%), sekä säleikköjen paine-ohjauksella (vihreä käyrä). Kun nyt katsotaan paineohjauksen vihreää käyrää kuvassa 56, havaitaan, että tunnelin ilman lämpötila pysyy plussan puolella ($+2^{\circ}\text{C}$ – $+1^{\circ}\text{C}$) tunnelin läntisessä osassa välillä Kivenlahti-Espoonlahti ollen samalla selvästi 5%-vakiokäyrän yläpuolella. Soukan asemasta itään on tunnelin ilman lämpötila kuitenkin jo reilusti pakkasen puolella. Tällöin paineohjauksen käyrä on myös melko lähellä 10%-vakiokäyrän muotoa.



Kuva 56. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus tunnelin ilman lämpötilaan.

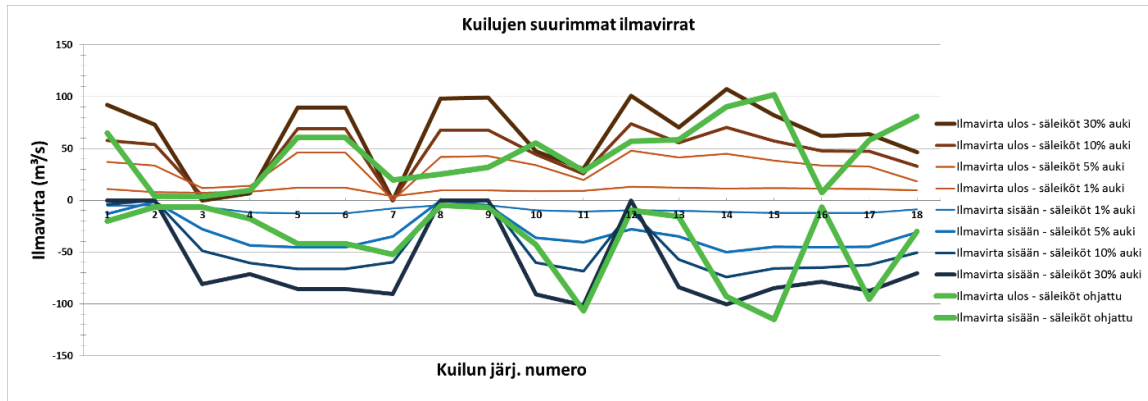
Kuvasta 57 havaitaan, että paineohjauksen vihreä käyrä käyttäytyy tunnelin seinämän pintalämpötilan kanssa samankaltaisesti kuin tunnelin ilman lämpötilankin kanssa. Tunnelin seinämän pintalämpötila pysyy selvästi plussan puolella ($+3^{\circ}\text{C} - +1^{\circ}\text{C}$) tunnelin läntisessä osassa (Kivenlahti-Soukka). Kivenlahti-Espoonlahti -välillä paineohjauksen lämpötilakäyrä ylittää korkeampiin lämpötiloihin kuin 5%-vakiokäyrä. Soukan asemasta itään putoaa vihreä käyrä kuitenkin pakkasen puolelle ollen keskimäärin melko lähellä 10%-vakiokäyrän muotoa.



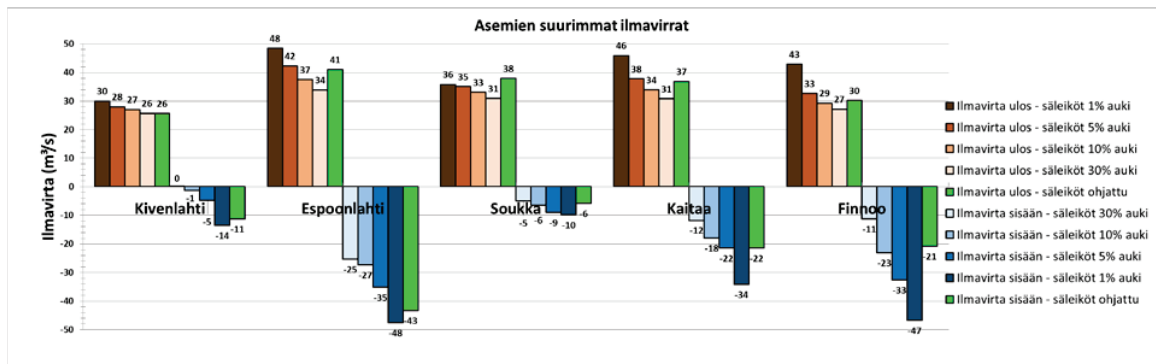
Kuva 57. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus tunnelin seinämän pintalämpötilaan.

Paineohjauksen lämpötilakäyrien käyttäytymistä voidaan selittää kohdassa 7.1 esitettyjen säleikköjen paineohjaus-kuvaajien avulla. Niitä tarkasteltaessa todettiin, että tunnelin läntisessä osassa kuilut ovat keskimäärin enemmän kiinni kuin tunnelin itäisessä osassa, mikä näkyy läntisessä osassa korkeampina lämpötiloina.

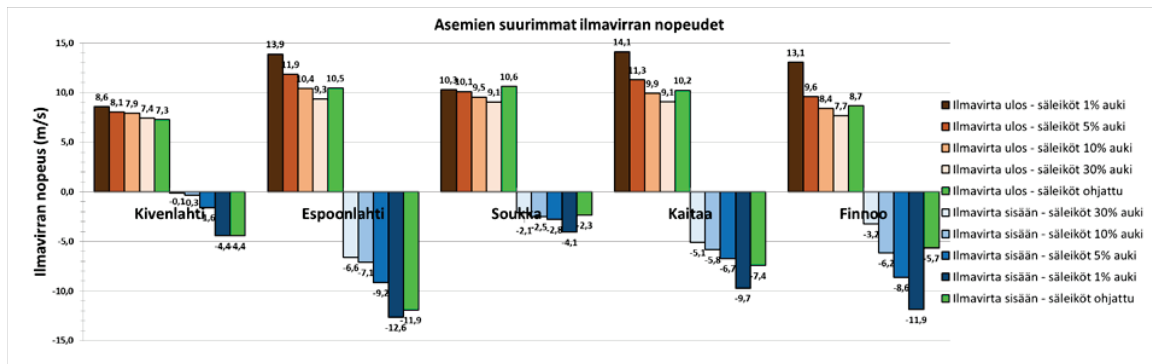
Kuvissa 58 ja 59 vertaillaan kuilujen ja asemien ilmavirtauksia säleikköjen eri vakioasentoilla (30%, 10%, 5% ja 1%), sekä säleikköjen paine-ohjauksella (vihreä käyrä). Vastaavasti kuvassa 60 vertaillaan asemien ilmavirran nopeuksia säleikköjen eri vakioasentoilla (30%, 10%, 5% ja 1%), sekä säleikköjen paine-ohjauksella (vihreä käyrä). Analysoidaan näistä tarkemmin ilmavirran nopeuksia asemilla, koska ilmavirran nopeudet ovat osoittautuneet mitoituspakkasjakson lämpötilanhallinnan kannalta rajoittavaksi tekijäksi.



Kuva 58. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus kuilujen ilmavirtojen vaihteluväliin.



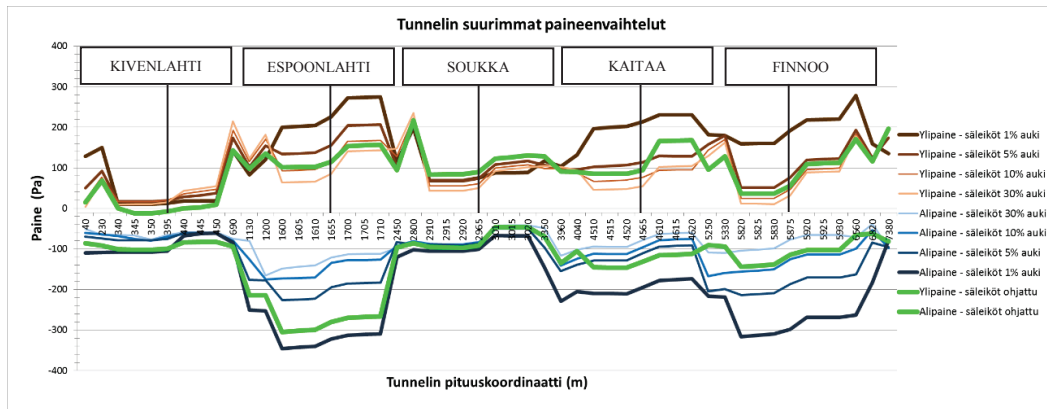
Kuva 59. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus asemien liukuporraskuilujen ilmavirtojen vaihteluväliin.



Kuva 60. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus asemien oviaukkojen ilmavirran nopeuksien vaihteluväliin.

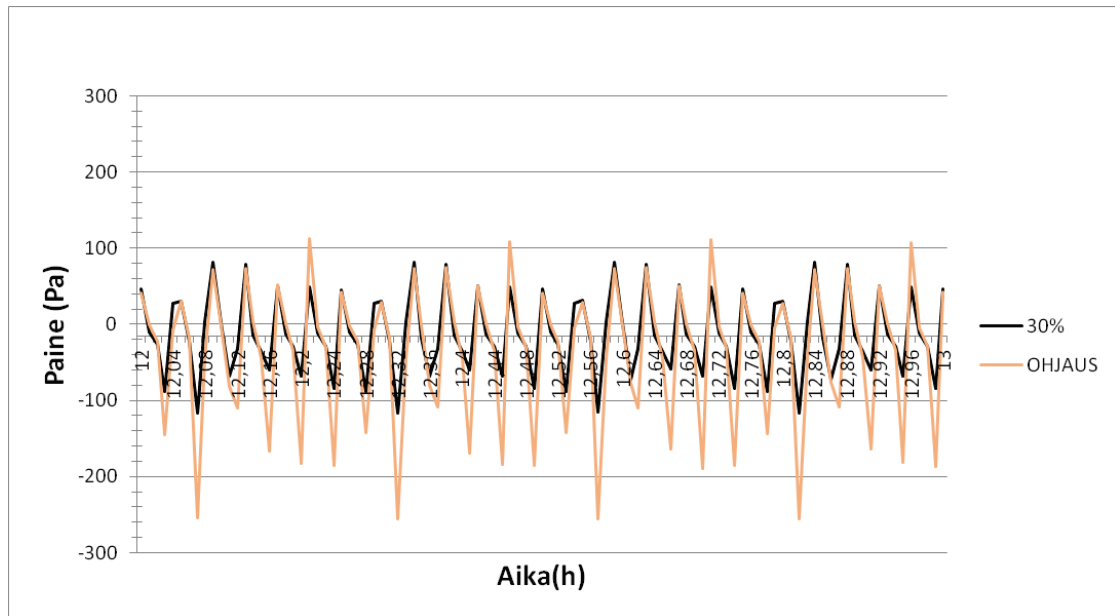
Kuvasta 60 havaitaan, että paineohjauksen myötä ilmavirran nopeudet ylittävät RATO:n 10 m/s raja-arvon Espoonlahden, Soukan ja Kaitaan asemilla. Suurin ylitys tapahtuu Espoonlahden asemalla, jolloin sisään tulevan ilmavirran nopeus on suurimmillaan 11,9 m/s. Muut nopeuden ylitykset ovat Soukka 10,6 m/s ja Kaitaa 10,2 m/s.

Kuvassa 61 vertaillaan säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutusta tunnelin suurimpiin ylipaine- ja alipaineuormiin. Havaitaan, että paineohjauksen käyrät vastaavat keskimäärin 5-10%-in vakio-asento -käyriä. Suurin ylipaineuorma paineohjauksella on 220 Pa, ja suurin alipaineuorma 305 Pa. Paineaaltojen superposition korjauskertoimen avulla vastaavat luvut ovat 880 Pa ja 1220 Pa.



Kuva 61. Säleikköjen paineohjauksen / vakioasentojen vaikutus tunnelin painekuormiin.

Kuvassa 62 puolestaan vertaillaan säleikköjen paineohjauksen sekä 30%-vakioasennon vaikutusta paineenvaihtelun amplitudiin Espoonlahden asemalla. Kuvasta 62 havaitaan, että muutos 30%-vakioasennosta paineohjattuun säätöön nostaa suurimman paineenvaihtelun amplitudin Espoonlahden asemalla 0,2 kPa:sta 0,34 kPa:han. Paineaaltojen superposition korjauskertoimen kanssa muutos on 0,8 kPa:sta 1,4 kPa:han. Oletetaan tässä, että paineenvaihtelun muutos aika tapahtuisi RATON:n ohjeistaman 4 sekunnin aikana. Tällöin paineohjattujen säleikköjen käytöllä pysyttäisiin vielä juuri ja juuri RATON määrittämän paineenvaihtelun amplitudin raja-arvon 1,5 kPa sisällä.



Kuva 62. Säleikköjen paineohjauksen sekä 30% vakioasennon vaikutukset paineenvaihtelun amplitudiin Espoonlahden asemalla.

Vertaillaan vielä säleikköjen paine-ohjausta säleikköjen vakio-kuristukseen. Simulointien perusteella säleiköille voidaan maksimissaan käyttää 5-10% vakio-kuristusta. Kuristusta rajoittaviksi aerodynaamiseksi tekijöiksi osoittautuivat asemien ilmavirtojen nopeudet. Oletetaan, että pieni RATON:n ilmavirran nopeuksien ohjearvojen ylitys sallitaan, ja käytetään

tällöin 5% vakiokuristusta. Kun 5% vakio-kuristustasoa, sekä säleikköjen paine-ohjausta verrataan kokonaisuutena keskenään voidaan todeta, että molemmissa tapauksissa ilmavirran nopeuksien raja-arvot ylittyvät saman verran (suurin nopeus molemmissa 11,9 m/s). Lisäksi molemmissa tapauksissa pysytään RATON määrittämän paineenvaihtelun amplitudin raja-arvon 1,5 kPa alapuolella. Näin ollen aerodynamiikan kannalta tapaukset eivät juuri eroa toisistaan. Sen sijaan lämpötilakäyriä vertaamalla havaitaan, että 5% vakiokuristuksella tunnelin lämpötilakäyrät ovat tasaisempia kuin paineohjauksella. 5% vakiokuristuksella tunnelin seinämän pintalämpötila pysyy kauttaaltaan plussan puolella, ja tunnelin ilman lämpötilakin pysyy osassa tunnelia plussan puolella ja pakkasen puolelle jäähtyvissäkin osissa on pakkasen kovimmillaan vain -2°C. Paineohjauksen lämpötilaprofiilit pysyvät plussan puolella tunnelin läntisessä osassa, mutta painuvat selvästi pakkasen puolelle, kun tunnelia kuljetaan itään päin. Näin ollen vakiokuristus saattaa kokonaisuutena olla parempi tapa hallita tunnelin lämpötiloja kuin paineohjaus. Ainakin työn tutkimusaineiston perusteella paineohjauksen kokonaisuhyöty jää lopulta hieman kyseenalaiseksi.

Lisäksi paineohjatut säleiköt olisivat todennäköisesti toiminnaltaan paljon monimutkaisempia, ja sitä kautta myös helpommin vioittuvia kuin perinteiset säleiköt (tässä työssä ei kuitenkaan syvennyt paineohjatun säleikön mahdollisiin käytännön toteutusratkaisuihin). Tällöin pitäisi puntaroida paineohjauksen avulla mahdollisesti saavutettuja säästöjä tunnelin pakkassuojauksessa verrattuna vakio-asennossa oleviin säleikköihin. Mahdollisena myöhemmänä jatkotutkimusaiheena voisi selvittää, pystyykö kullekin säleikön ohjaukselle asettamaan yksilöllisen paineen raja-arvon siten, että ilmavirran nopeudet eivät ylitä missään kohtaa tunneliverkostoa, ja tämän jälkeen vielä tarkastella lämpötilaprofiilin lopullista muotoa tunnelissa. Lisäksi on aiheellista pohtia, onko paineohjaus ylipäänsä järkevää toteuttaa paineentasauskuiluihin. Toisena jatkotutkimusaiheena voisikin selvittää, pystyykö esimerkiksi asemien oviaukkojen läheisyyteen sijoittamaan ylipainepelejä, jotka avautuvat tarvittaessa, mikä rajoittaa ilmavirtojen nopeutta oviaukkojen läheisyydessä.

8 Johtopäätökset

Metrotunneliverkoston olosuhdehallinta on tärkeä osa metroverkoston suunnittelua. Olosuhdehallintaa tarvitaan, jotta voidaan kontrolloida esimerkiksi poikkeuksellisen kylmän tai kuuman ilmaston vaikutusta tunnelissa, huonoa ilmanlaatua suurkaupunkien metroissa, suurilla nopeuksilla kulkevien junien aiheuttamia aerodynaamisia ongelmia, tai turvallista matkustajien evakuointia tulipalotilanteessa. Suomen ilmastossa eniten haasteita metrotunnelin olosuhteille aiheuttaa kylmyys talvikuukausina. Jos talvella ilmenee poikkeuksellisen ankaria pakkasjaksoja, voi tällöin pakkasen tunkeutua syvälle tunneleihin aiheuttaen vaurioita tunnelin tekniikalle ja rakenteille.

Tarpeenmukaisten lämpöolosuhteiden saavuttaminen metrotunneliverkostossa on usein haastava tehtävä, johtuen pääasiassa tunnelin suurista sekä vaikeasti arvioitavissa olevista ilma- ja lämpövirtauksista. Taloudellisesti ja ekologisesti kestävien, sekä halutulla tavalla toimivien metrotunneliverkoston olosuhdehallintajärjestelmien toteuttaminen edellyttää näin ollen tunnelin fysikaalisen käyttäytymisen vahvaa ymmärrystä. Metrotunnelissa sisäilmaston tunnuslukujen (esim. lämpötila, ilmavirran nopeus tai ilman paineenvaihtelut) arvioiminen etukäteen on lähes mahdoton tehtävä ilman sopivaa simulointiohjelmistoa.

Metrotunneliverkoston olosuhteiden arvioimiseen voidaan käyttää joko 1D-, tai 3D-virtauslaskentaohjelmistojä. 1D-virtauslaskentaohjelmistot ovat laskennallisesti kevyempiä, joten ne ovat sopivia metrotunneliverkoston olosuhteiden karkeaan mitoittukseen silloin, kun halutaan tarkastella isoa kokonaisuutta, esimerkiksi useampaa maanalaista metroasemaa, asemien välillä olevaa tunneliosuutta sekä näihin yhteydessä olevia paineentauskuiluja. 3D-virtauslaskentaohjelmistot sopivat puolestaan pienempien kokonaisuuksien tarkkaan mallintamiseen. Tällöin voidaan tutkia esimerkiksi ilmavirran nopeusjakaumaa tunnelin tietyssä osassa tai liikkuvan junan aiheuttamaa painekentän muotoa asemalaiturilla.

Tunnelisimuloinnissa on hyödyllistä ymmärtää tunnelin termodynaamisen ja aerodynaamisen käyttäytymisen perusteet. Tunnelin lämpödynaaminen malli voidaan esittää sylinterikoordinaatistossa olevan solmupisteverkon avulla, jossa otetaan huomioon sekä tunnelin aksiaalisessa suunnassa kulkeva lämpövirta (ilmavirta), että säteen suunnassa kulkeva lämpövirta (lämmönsiirto tunnelin ilman sekä seinärakenteen välillä). Lisäksi maaperän lämpötilan hidas reagointi ympäristön olosuhdemuutoksiin on aina otettava huomioon tunnelin olosuhteita laskettaessa. Tunnelin ilmavirtaukset puolestaan syntyvät lämpötilaeron, korkeuseron, tuulenpaineen tai junan mäntäpaineen aiheuttamana. Oleellista on myös tarkastella erikseen tunnelin luonnollista ilmavirtausta sekä junaliikenteen aiheuttamaa ilmavirtausta. Junan aiheuttamien paineiskujen laskennassa on syytä ottaa huomioon paineaaltojen superpositio tunnelissa.

Suomessa metrohankkeita koskevat monet erilaiset lait, asetukset, viranomaismääräykset sekä ohjeet. Erityisesti HKL:n julkaisema Metrosuunnittelun käsikirja (MSK) on tarkoitettu metrotunneleiden ja metroasemien suunnittelun ohjeeksi. Lisäksi esimerkiksi Länsimetrohankkeessa käytännön suunnittelutyötä ohjaavat Länsimetron omat suunnitteluohjeet. Olosuhdevaatimusten näkökulmasta ohjeissa määritellään tavoitteet metrotunnelin sekä metroasemien olosuhteille, sekä ohjeistetaan millä suunnitteluratkaisuilla haluttuihin olosuhteisiin päästään. Lisäksi RATO, eli ratatekniset ohjeet, sisältää mitoitusperusteita junaliikennekäytössä olevien tunneleiden lämpötekniselle ja aerodynaamiselle mitoitukselle.

Tässä työssä tutkittiin suomalaista metrotunneli-hanketta, Länsimetroa, lämpöolosuhteiden hallinnan näkökulmasta. Työssä Länsimetro vaihe 2:n tunneliosuus, kuilut, sekä maanalaiset asemat mallinnettiin tunneleiden dynaamiseen olosuhdelaskentaan kehitetyn simulointiohjelman, IDA Tunnelin, avulla. Simulointitulosten avulla saatiin täytettyä työn tärkeimmät tavoitteet, jotka olivat:

1. **Eritellä ja analysoida** merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat erityisen kylmän talvi-ajan lämpötilojen hallintaan Länsimetron tunneliosuuksilla sekä asemilla.
2. **Määrittää**, kuinka paljon Länsimetron tunneliosuuden sekä metroasemien lämpötiloja on talvella mahdollista nostaa heikentämällä tunnelin ilmanvaihtoa sekä aerodynaamista toimintaa.
3. **Tarjota lähtötietoja** Länsimetron LVI-suunnittelijoille.

Länsimetron tunnelin LVI-tekniikan pakkassuojauksen mitoituksen suunnittelu oli tärkein motiivi, jonka perusteella tämän työn tunnelisimulointeja lähdettiin alun perin tekemään. Tunnelissa kulkevan tekniikan toiminnan kannalta on tärkeää selvittää, kuinka kylmäksi tunneliverkosto voi kovan pakkasjakson aikana jäähtyä. Simuloinneissa osoittautui, että keskimäärin talvella Länsimetron tunnelissa lämpötila pysyy välillä $+10^{\circ}\text{C} - +5^{\circ}\text{C}$, mutta kun poikkeuksellisen kova -30°C pakkanen kestää yhtäjaksoisesti 7 vrk peräkkäin, putoaa lämpötilat tunnelissa välille $-1^{\circ}\text{C} - -12^{\circ}\text{C}$.

Lämpötilan voimakas putoaminen kovalla pakkasella oli seurausta paineentasauskuilujen sekä metroasemien liukuporraskuilujen kautta kulkevista suurista ilmavirtauksista, jotka jäädyttävät tunnelia tehokkaasti kovalla pakkasella. Ilmavirtaukset olivat seurausta sekä tunnelin hormivaikutuksesta, että junan aiheuttamasta mäntäefektistä.

On huomioitava, että mitoittava pakkasjakso ($-30^{\circ}\text{C} / 7$ vrk) saa tunnelin jäähtymään niin paljon pakkasen puolelle, että se alittaa kaikissa suunnitteluohjeissa määritetyt lämpötilan minimitalvotasot, mikä pitää huomioida tunnelin tekniikan pakkassuojauksen mitoituksessa sekä mahdollisesti asemien lämmitysjärjestelmien suunnittelussa.

Kovalla pakkasella tunnelin lämpötilan putoamista voidaan tehokkaasti hidastaa paineentasauskuilujen säleikköjen osittaisella sulkemisella. Säleikköjen kuristaminen kuitenkin häiritsee tunnelin aerodynaamista toimintaa, mikä ilmenee ilmavirran nopeuksien sekä yli- ja alipaineiskujen kasvuna tunneliverkostossa. Aerodynaamiset ongelmat on otettava tarkasti huomioon silloin, kun tunnelin lämpötiloja halutaan nostaa tunnelin virtausaukkoja pienentämällä. Liian voimakkaat paineaallot voivat aiheuttaa metrossa matkustaville ihmisille huomattavaa epämukavuutta ja joissain tapauksissa myös terveydellisiä ongelmia kaikkein herkimmille yksilöille. Lisäksi voimakkaat paineaallot sekä suuret ilmavirran nopeudet saattavat aiheuttaa meluhaittoja tunnelin ympäristöön, lisätä junan kulkuvastusta tunnelissa sekä vaurioittaa tunnelin rakenteita ja tunnelissa kulkevaa tekniikkaa.

Simuloinneilla selvitettiin säleikköjen kuristamisen lämpötiloja kohottava vaikutus, sekä tutkittiin kuinka paljon tunnelin aerodynaamiset olosuhteet samalla heikentyivät. Osoittautui, että säleikkökuristuksen rajoittava aerodynaaminen tekijä on asemien ilmavirran nopeudet, sillä ne rajoittivat säleikköjen kuristustason 10%:iin silloin, jos RATO:n määrittämä ilmavirran nopeuden raja-arvoa 10 m/s ei haluta ylittää. Sen sijaan tunnelin paineen-

vaihtelut eivät osoittautuneet yhtä kriittiseksi tekijäksi kuin asemien ilmavirran nopeudet. Paineenvaihtelut rajoittaisivat maksimaalisen säleikkökuristuksen 5%:iin.

10%:n säleikkökuristus nostaa mitoituspakkasjakson aikana tunnelin lämpötiloja 2-5°C verrattuna säleikköjen 30% kuristukseen, jota käytettiin mitoituspakkasjakson säleikköjen oletusasentona. 10%:n säleikkökuristus ei kuitenkaan riitä pitämään tunnelin lämpötiloja plussan puolella, joten tunnelin tekniikan pakkassuojausta tarvitaan joka tapauksessa.

Sen sijaan 5% kuristuksella tunnelin seinämän pintalämpötila pysyisi kauttaaltaan plussan puolella, ja tunnelin ilman lämpötilakin pysyisi osassa tunnelia plussan puolella ja pakkasen puolelle jäähtyvissäkin osissa olisi pakkasen kovimmillaan vain -2°C. Tämän vuoksi olisikin syytä harkita, voidaanko kovan pakkasjakson aikana poiketa RATO:n määrittämistä ilmavirran nopeuksien ohjearvoista, ja sallia nopeuksien hetkellinen nousu lähemmäs 12 m/s. Tämän muutoksen hyväksyminen vähentäisi huomattavasti tunnelin pakkassuojauksen tarvetta, mikä intuitiivisesti tuntuisi tärkeämmältä tekijältä kuin nopeuksien rajoittaminen. Toisaalta tällöin olisi myös varmistettava, ettei RATO:n ilmavirran nopeuksien ohjearvojen ylittäminen kohtuuttomasti häiritse matkustajien viihtyvyyttä.

Lisäksi on huomioitava, että IDA Tunnel-ohjelman painelaskelmien tulokset eivät ole tarkkoja lukemia tunnelin todellisista paineiskuista (ks. kohta 5.2.5). Ennen kuin 5%:in säleikkökuristusta voitaisiin todellisuudessa käyttää, olisi painelaskelmien tulokset hyvä tarkistaa esim. ThermoTun-ohjelman avulla. Painelaskelmien tulosten oikeellisuuden varmistaminen on tärkeää, sillä liian suuret paineiskut saattavat pahimmassa tapauksessa vaarantaa matkustajien terveyden, tai vahingoittaa esimerkiksi laituritasolla olevia herkkiä rakenteita.

Lisäksi tämän työn simuloinneissa tutkittiin säleikköjen tarpeenmukaista aukiolon ohjausta painesäädön avulla. Simulointimalliin ohjelmoitiin makro, joka ohjasi säleikköjen aukioloa yli- tai alipaineen avulla. Kun paineohjausta verrattiin säleikköjen 5%:n vakiokuristukseen, osoittautui, että aerodynamiikan kannalta tilanteet eivät juuri eronneet toisistaan. Molemmissa tapauksissa ilmavirran nopeuksien raja-arvot ylittyivät saman verran ja paineenvaihtelun amplitudin raja-arvot pysyivät molemmissa tapauksissa sallituissa rajoissa. Sen sijaan 5% vakiokuristuksella tunnelin lämpötilakäyrät olivat tasaisempia ja ne pysyivät hieman paremmin plussan puolella verrattuna paineohjaukseen. Näin ollen vakiokuristus saattaa kokonaisuutena olla parempi tapa hallita tunnelin lämpötiloja kuin paineohjaus. Ainakin työn tutkimusaineiston perusteella paineohjauksen kokonaisuhyöty jäi lopulta hieman kyseenalaiseksi. Mahdollisena myöhempanä jatkotutkimusaiheena voisikin esimerkiksi selvittää, pystyykö asemien oviaukkojen läheisyyteen sijoittaa ylipainepeltejä, jotka avautuvat tarvittaessa, mikä rajoittaa ilmavirtojen nopeutta oviaukkojen läheisyydessä. Tällöin paineentasauskuilujen säleikköihin ei tarvittaisi paineohjausta ollenkaan.

9 Lähdeluettelo

Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Jantunen, M., Kousa, A., Koskentalo, T., Mäkelä, T., Hillamo, R., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M. & Tervahattu, H., 2006. *Pienhiukkaset Helsingin metrossa*. YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/PJS_B_1_2006_pienhiukkaset_metrossa.pdf.

Ampofo, F., Maidment, G. & Missenden, J., 2004. *Underground railway environment in the UK part 1: Review of thermal comfort*. Applied Thermal Engineering. Vol. 24. S. 611-631. Saatavissa: doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.10.017.

Ampofo, F., Maidment, G. & Missenden, J., 2004. *Underground railway environment in the UK part 2: Investigation of heat load*. Applied Thermal Engineering. Vol. 24. S. 663-645. Saatavissa: doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018.

Ampofo, F., Maidment, G. & Missenden, J., 2004. *Underground railway environment in the UK part 3: Methods of delivering cooling*. Applied Thermal Engineering. Vol. 24. S. 647-659. Saatavissa: doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.10.019.

Carteni, A., Cascetta, F. & Campana, S., 2015. *Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system*. Atmospheric Environment. Vol. 24. S. 328-337. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.030>.

Chen, J., Deng, X., Luo, Y., He, L., Liu, Q. & Qiao, X., 2015. *Investigation of microstructural damage in shotcrete under a freeze-thaw environment*. Construction and Building Materials. Vol. 83. S. 275-282. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.042>.

Ekström, A., Granlund Oy, 2016. *Haastattelu (6.7.2016)*.

EQUA Simulation AB, 2012. *IDA Tunnel, Theoretical Reference, version: 4.5 build 1*.

EQUA Simulation AB, 2013. *Getting Started Guide. IDA Tunnel Application, version 1.1*.

EQUA Simulation AB, 2016. *Calculation of pressure transients for the Länsimetro-line using THERMOTUN*.

Gawthorpe, R., 2000. *Pressure effects in railway tunnels*. Rail International Monthly Review of the IRCA/UIC. April 2000. S. 10–17. [Viitattu: 17.8.2016]. Saatavissa: <http://www.youcon.co.kr/common/download.asp?file=pressure%20effects%20in%20railway%20tunnels.pdf>.

HKL, 2008. *Metrosuunnittelun käsikirja*.

HKL, 2015. *Tietoa HKL:n kalustosta*. Verkkojulkaisu. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/www/hkl/fi/Metrolla/Kalusto/M300>.

Hu, S.-C. & Lee, J.-H., 2004. *Influence of platform screen doors on energy consumption of the environment control system of a mass rapid transit system: Case study of the Taipei*

MRT system. Energy Conversion and Management. Vol. 45. S. 639-650. Saatavissa: DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00188-2.

Ilmatieteenlaitos, 2016. *Ilmatieteenlaitoksen open data -verkkopalvelu*. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>.

Jun, W., Yijia, C., Wang, X., Fan, L., Pan, S., Xue, H., Xiang, Y. & Xie, L., 2015. *Information-applied Technology for SES on subway thermal environment simulation*. 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015). [Viitattu: 12.7.2016]. Saatavissa: www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=23309.

Kim, J.-Y. & Kim, K.-Y., 2009. *Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 97. S. 174-179. Saatavissa: doi:10.1016/j.jweia.2009.06.002.

Ko, Y.-Y., Chen, C.-H., Hoe, I.-T. & Wang, S.-T., 2012. *Field measurements of aerodynamic pressures in tunnels induced by high speed trains*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 100. S. 19-29. Saatavissa: doi:10.1016/j.jweia.2011.10.008.

Kwon, S.-B., Jeong, W., Park, D., Kim, K.-T. & Cho, K.H., 2015. *A multivariate study for characterizing particulate matter (PM10, PM2,5, and PM1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea*. Journal of Hazardous Materials. Vol. 297. S. 295-303. [Viitattu: 15.7.2016]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.015>.

Lai, Y.-M., Wu, Z., Zhu, Y. & Zhu, L., 1999. *Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels*. Cold Regions Science and Technology. Vol. 29. S. 89-96. Saatavissa: PII: S0165-232X(99)00006-3.

Lin, C.-J., Chuah, Y. K. & Liu, C.-W., 2008. *A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system*. Applied Thermal Engineering. Vol. 28. S. 372-379. Saatavissa: doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.10.003

Liu, X., Xiao, Y., Inthavong, K. & Tu, J., 2014. *A fast and simple numerical model for a deeply buried underground tunnel in heating and cooling applications*. Applied Thermal Engineering. Vol. 62. S. 545-552. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.017>.

Li, Y.-F., Bian, J. & Li, J.-M., 2014. *Research on smoke flow in a tunnel fire of subway system*. Procedia Engineering. Vol. 71. S. 390-396. Saatavissa: doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.056.

Länsimetro Oy, 2013. *Länsimetro-suunnitteluohjeet*.

Länsimetro Oy, 2016. *Länsimetro-verkkosivut. Tietoa hankkeesta*. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: <http://www.lansimetro.fi/tietoa-hankkeesta.html>.

Länsimetro Oy, 2016. *Länsimetro-verkkosivut. Tietoa hankkeesta, usein kysyttyä*. [Viitattu 15.1.2016]. Saatavissa: <http://xn--lansimetro-v2a.fi/tietoa-hankkeesta/usein-kysyttya.html>.

Länsimetro-kuvapankki, 2015. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa: <https://www.flickr.com/photos/lansimetro/albums/72157623601551263>.

Mazarrón, F. R., Porras-Amores, C. & Cañas-Guerrero, I., 2015. *Annual evolution of the natural ventilation in an underground construction: Influence of the access tunnel and the ventilation chimney*. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 49. S. 188-198. [Viitattu:15.7.2016]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.015>.

Modelica, 2016. *Modelica-verkkosivut*. [Viitattu: 12.7.2016]. Saatavissa:<https://modelica.org>.

Rail System, 2015. *Railsystem-verkkosivut*. [Viitattu: 11.7.2016]. Saatavissa:<http://www.railsystem.net/simulation-software-tunnel-ventilation>.

Ratahallintokeskus, 2008. *Ratatekniset ohjeet. Osa 18. Rautatietunnelit*.

Reittiopas, 2016. *Reittiopas-aikataulut*. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa:<http://aikataulut.reittiopas.fi/linjat/fi/hMetro.html#p5>.

Rossi, R., Suominen, P., Siivola, M., Hakkarainen, S., Sjöblom, L., Viitala, R., Häyrynen, J., Kervinen, H., Tallberg, C., Uusi-Rauva, V. & Rautio, J., 2012. *Länsimetron jatke, hankesuunnitelma Matinkylä-Kivenlahti*. [Viitattu 14.7.2016]. Saatavissa: http://www.lansimetro.fi/images/stories/aineistot_raportit/matinkyla-kivenlahti_metro-hankesuunnittelu_web.pdf.

Ruohomäki, V., Mipro Oy, 2016. *Sähköpostihaastattelu (23.2.2016)*

Sahlin, P., 2014. *Executed projects with the commercially available software IDA Tunnel*. Solna. EQUA Simulation AB.

Sahlin, P., Eriksson, L., Grozman, P., Johnsson, H. & Ålenius, L., 2006. *ID models for thermal and air quality prediction in underground traffic systems*. 12th international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Portoroz, Slovenia. [Viitattu:15.7.2016]. Saatavissa: http://www.equa.se/dncenter/SahlinAVVT06_final.pdf.

Sahlin, P. & Grozman, P., 2003. *IDA Simulation Environment - a tool for Modelica based end-user. s.l.* The 3rd International Modelica Conference. [Viitattu: 15.7.2016]. Saatavissa: https://modelica.org/events/Conference2003/papers/h33_Sahlin.pdf.

Sirén, K., 2013. *Rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeen laskenta yksinkertaisella tuntitason mallilla*. Luentomoniste. Aalto-Yliopisto.

ThermoTun, 2016. *ThermoTun-ohjelman verkkosivut*. [Viitattu: 16.8.2016]. Saatavissa: <http://www.thermotun.com/thermotun/>.

US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, 2002. *Subway Environmental Design Handbook, vol. II: Subway Environmental Simulation Computer Program, SES Version.4.1.* Part 1, User's Manual.

Yang, Z., Su, X., Feng, M., Longqing, Y. & Hongna, Wang., 2015. *An innovative environmental control system of subway.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 147. S. 120-191. [Viitattu: 15.7.2015]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.015>.

Yuan, F.-D. & You, S.-J., 2007. *CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform.* Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 22. S. 474-482. Saatavissa: doi:10.1016/j.tust.2006.10.004.